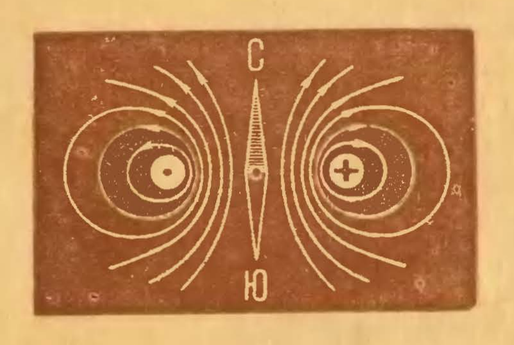
МАССОВАЯ
РАДИО-
БИБЛИОТЕКА

В. А. ЗАРВА

МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Материал, приведенный в главе I настоящей книги и касающийся основных магнитных величин, изложен с точки зрения физических явлений, имеющих место в магнитном поле.

Однако для точных расчетов, которых требует современная электротехника, этого оказывается недостаточно.

Ниже приводятся определения основных магнитных величин.

1. Все пространство, в котором проявляются магнитные силы, называется магнитным силовым полем или просто магнитным полем.

2. Общее число магнитных силовых линий, создаваемых постоянным магнитом или электрическим током, называется магнитным потоком. Магнитный поток обозначается буквой Ф и измеряется единицами, носящими название максвелл (сокращенное обозначение — *мкс*). Если скорость изменения магнитного потока, сцепленного с каким-либо контуром, составляет 1 *мкс/сек*, то в контуре наводится э. д. с., равная 10^{-8} *в*.

Магнитные линии обладают двумя важными свойствами. Во-первых, они замкнуты, т. е. не имеют ни начал, ни концов; во-вторых, они всегда сцеплены с контурами тех токов, которые создали магнитное поле.

3. Действие магнитного поля на магнитную стрелку (или проводник с током), находящуюся в этом поле, определяется не полной величиной магнитного потока, а лишь той его частью, которая пронизывает стрелку, т. е. густотой магнитных линий в том месте, где находится стрелка.

Мерой интенсивности магнитного поля является магнитная индукция, представляющая собой число силовых линий, приходящихся на единицу площади, например на 1 *см*². При этом предполагается, что площадка расположена перпендикулярно направлению силовых линий. Таким образом, магнитная индукция может быть определена как плотность магнитного потока. Сгущение магнитных линий в какой-нибудь части поля указывает на то, что магнитная индукция в этой области возрастает.

Единицей магнитной индукции является гаусс (сокращенно — *гс*). При магнитной индукции в 1 *гс* через 1 *см*² поперечного сечения проходит 1 линия. Обозначается магнитная индукция буквой B.

Через площадку Q проходит магнитный поток

$$Ф = BQ,$$

причем предполагается, что индукция во всех точках площадки одна и та же, а площадка расположена перпендикулярно магнитным линиям и величина ее измерена в квадратных сантиметрах.

Измерение величины магнитной индукции сводится к измерению той силы, с которой магнитное поле действует на внесенный контур с током. Если в однородное магнитное поле с индукцией в 1 *гс* внести прямолинейный провод, обтекаемый током в 1 *а* и расположенный перпендикулярно магнитным линиям, то на каждый метр длины провода будет действовать сила 10,2 *мг*.

4. Если магнитное поле возникает не в пустоте, а в магнетиках, то явления в них усложняются. Магнетиком называется такое вещество, частицы которого обладают собственным магнитным моментом. В этом случае атомные токи создадут дополнительное поле, которое должно быть учтено при расчетах.

(Окончание на 3-й стр. обложки)

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 119

В. А. ЗАРВА

МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

В книге приводятся сведения о физической сущности магнетизма и электромагнетизма. Кроме того, книга знакомит читателя с возможностями использования этих явлений в практической работе радиолюбителя.

Задача книги — расширить теоретический кругозор радиолюбителя с тем, чтобы он мог приложить полученные знания к своей практической конструкторской и изыскательской работе.

Рассчитана книга на радиолюбителя, имеющего первоначальные знания в области электро- и радиотехники.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *З. Б. Гинзбург* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 6/IV 1951 г. Подп. к печ. 29/VIII 1951 г.
Бумага 84×108 1/32 = 1 3/4 бумажных — 5,74 п. л. 6,5 уч.-изд. л.
Т-05936 Тир. 25 000 экз. Зак. 1151.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ВВЕДЕНИЕ

Машины, приборы и аппараты, работающие с использованием магнитных явлений, широко применяются в разнообразных отраслях народного хозяйства, в науке, медицине, быту, в военном деле. Они вырабатывают электрический ток и приводят в движение поезда и трамваи, плавят и закаливают высококачественную сталь, поднимают на заводах тяжелые и неудобные по форме грузы; обнаруживают внутренние скрытые пороки в стальных изделиях, разведывают земные недра, обнаруживают заложенные противником мины и взрывают свои заградительные мины при приближении неприятельского судна; производят измерения разнообразнейших величин, позволяют ориентироваться в пространстве, поддерживать телефонную и телеграфную связь, записывать и воспроизводить звук, осуществлять радиовещание и телевидение и выполнять тысячи других разнообразных и полезных для человека работ. Изучению основных законов, которыми управляются магнитные явления, ознакомлению с работой магнитных и электромагнитных устройств и с применяемыми в технике магнитными материалами и посвящена настоящая книга.

Явление магнетизма — способность некоторых тел притягивать железные и стальные предметы[1] — известно из глубокой древности.

В китайских летописях, относящихся к 1110 г. до нашей эры, сохранился рассказ о магнитных колесницах, на кото-

[1] Химический элемент железо в чистом виде из-за сложности его получения, дороговизны и присущих ему механических свойств применяется редко. Изделия, которые часто называют железными (проволока, гвозди, листы), изготовляются из железа, содержащего углерод, которое называется сталью. Поэтому вместо термина „железо" для всех изделий, изготовленных не из чистого рафинированного железа, сейчас применяется более правильный термин „сталь". Сталь, содержащая большой процент углерода, тверда и поэтому называется твердой сталью, сталь, содержащая мало углерода, мягка и называется мягкой сталью. Подробнее этот вопрос рассматривается в гл. 4.

рых устанавливалась вращающаяся фигурка, указывавшая рукой на юг. Такими колесницами китайский император Чеу-Кун одарил привезших ему подарки послов далекой страны Вьетнам, чтобы они не заблудились на обратном пути. Во время имевших место в Китае междуусобных войн секрет магнитных колесниц был утерян и вновь был открыт много лет спустя — в 225 г. нашей эры.

На Западе, в Европе удивительные свойства магнита также были известны давно. Живший более двух тысяч лет тому назад греческий философ Платон упоминает о магнитном камне, который не только сам притягивал железные кольца, но и одарял их своей силой.

По другому дошедшему до нас преданию явление магнетизма получило свое название от имени города Магнезия в Малой Азии, вблизи которого находили магнитную руду, способиую притягивать стальные предметы. Магнитные руды (магнитный железняк — магнетит) часто встречаются в природе; в частности, в СССР магнитные руды имеют значительное распространение на Урале (горы Магнитная, Благодать, Высокая и др) [1].

Если кусок магнитной руды опустить в опилки из мягкой стали, то часть опилок прилипнет к куску руды, причем наибольшее количество их окажется на двух противоположных коицах куска, в то время как посередине между ними опилок почти не будет.

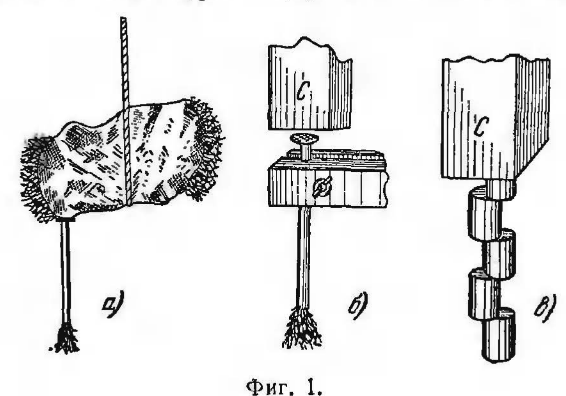
С куском магнитной руды можно произвести еще ряд других опытов. Возьмем обыкновенный стальной гвоздь и опустим его в опилки; при этом никакого взаимодействия между гвоздем и опилками мы не обнаружим. Затем притянем гвоздь куском руды и снова опустим его в опилки. Теперь мы видим, что опилки притянутся к гвоздю как к магниту и будут держаться около него до тех пор, пока гвоздь притягивается магнитной рудой (фиг. 1,*а*).

Если удалить магнит от гвоздя, то опилки упадут. Таким образом, мы видим, что стальные предметы, притянутые магнитом, сами на время становятся магнитом и могут притягивать другие стальные предметы. Но в то время как кусок магнитной руды проявляет свои магнитные свойства всегда, сталь эти свойства приобретает, только находясь в непосредственной близости к магниту, причем для этого

---

[1] На базе руд горы Магиитной работает Магнитогорский металлургический завод.

нет необходимости в прямом соприкосновении с магнитом: намагничивающее влияние магнита сказывается уже на некотором расстоянии. Это можно проверить следующим образом: убедившись, что гвоздь не притягивает опилок, укрепим его вертикально в штативе. Если теперь к верхнему концу гвоздя приблизить на некоторое расстояние (2—3 *мм*) магнит, то гвоздь приобретет магнитные свойства и станет притягивать опилки (фиг. 1,*б*). Это явление магнитного



Фиг. 1.

влияния на расстоянии носит название магнитной индукции[1].

Пользуясь свойством стали намагничиваться, можно к полюсу магнита подвесить целую цепочку из кусочков стальной проволоки, так как каждый из них, находясь в непосредственной близости к намагниченному телу, сам становится магнитом. Но стоит только магнит оторвать от верхнего кусочка, как вся цепочка рассыпется на свои составные части. С удалением магнита магнитные свойства частей цепочки исчезают (фиг. 1,*в*).

Если вместо гвоздя притянуть магнитной рудой какой-либо предмет из твердой стали — перо, иглу или просто кусок стали — и опустить его в опилки, то можно обнаружить, что после удаления куска руды опилки не упадут и будут продолжать притягиваться сталью: сталь намагнити-

[1] Аналогичное явление электрической индукции можно наблюдать в опытах с электрическими зарядами: если тело, заряженное электричеством любого знака, приблизить на некоторое расстояние к другому телу, не имеющему собственного заряда, то в этом последнем индуктируются (наводятся) электрические заряды.

лась и сама стала магнитом. В стали сохранился **остаточный магнетизм**, так как она обладает способностью сохранять свои магнитные свойства.

Магниты, изготовляемые из стали или из специальных сплавов, в отличие от естественных магнитов — магнитной руды—называются искусственными или просто **постоянными магнитами**. Магнитные свойства искусственных магнитов во много раз выше свойств естественных магнитов; кроме того, им легко может быть придана любая нужная форма. Поэтому во всех случаях, когда нужен постоянный магнит, применяют искусственные магниты; естественные же магниты в практических условиях не применяются.

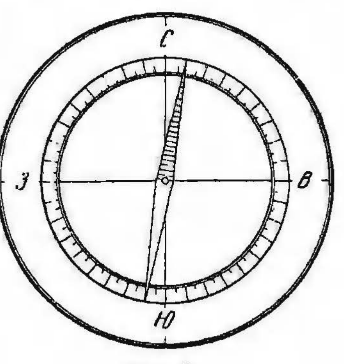
Мы уже заметили, что при опускании куска магнитной руды в опилки они притягиваются главным образом к двум его противоположным концам. Если вместо руды взять постоянный магнит, изготовленный из длинного куска намагниченной стали, то явление будет выражено яснее: почти вся масса притянутых магнитом опилок будет находиться у его концов (особенно у острых краев концов магнита), в то время как по направлению к середине магнита количество их будет быстро убывать, а у самой середины их почти не окажется вовсе. Концы магнита, в которых проявляется наибольшая сила притяжения, называются его **полюсами**.

Произведем следующий опыт: подвесим легкий стальной магнит, привязав нитку к его середине, и оставим его в покое. Если вблизи магнита нет стальных предметов, то после нескольких качаний магнит займет такое положение, при котором один конец его будет указывать на север, а другой — на юг. Если мы попробуем повернуть магнит так, чтобы его полюса поменялись местами, то увидим, что он не сохранит приданного ему положения, а снова повернется по направлению север — юг теми же концами, что и первый раз. Причина этого заключается в том, что земля представляет собой как бы огромный магнит и действует на все остальные магниты, находящиеся на земле. Конец магнита, направленный на север, называется его **северным полюсом**, а противоположный — **южным**.

Свойством свободно подвешенного магнита всегда становиться по линии север — юг широко пользуются на земле, на море и в воздухе для определения направления. Для этого тонкую намагниченную полоску твердой стали, изго-

товленную в виде легкой стрелки с острыми концами, устанавливают на острие шпильки, находящейся в центре окружности, описанной диаметром, равным или несколько большим длины стрелки.

Для облегчения наблюдения северный полюс стрелки окрашивают, а на концах двух проведенных под прямым углом диаметров окружности ставят названия стран света: север — юг, запад — восток. Страны света обозначают начальными буквами русских или латинских их названий: *С*, *Ю*, *В* и *З* или *N* (Nord — север), *S* (Sud—юг), *W* (West—запад), *E* (Est — восток).



Фиг. 2.

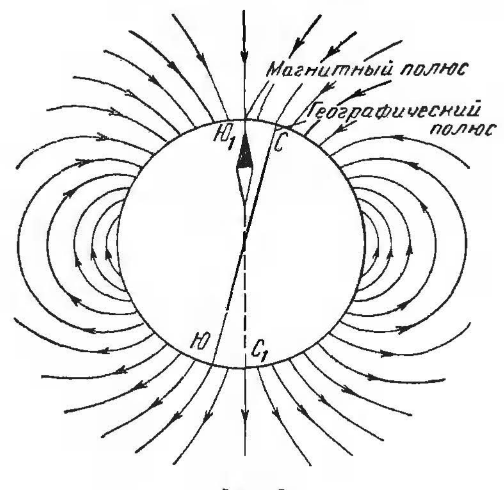
Изготовленный таким образом прибор называется **компасом** или **буссолью** (фиг. 2).

Если мы поднесем к компасу какой-либо стальной предмет, например гвоздь, то увидим, что ближайший конец стрелки независимо от того, будет ли это северный или южный полюс, тотчас же притянется к нему. Но если мы вместо стали поднесем к компасу магнит, то картина существенно изменится: при приближении северного полюса магнита северный полюс стрелки начнет удаляться, а южный полюс — приближаться. Если мы поднесем магнит к компасу южным полюсом, то произойдет обратное явление: южный полюс стрелки компаса оттолкнется, а северный притянется. На основании этого наблюдения мы можем вывести заключение, что **одноименные полюса магнитов отталкиваются, а разноименные притягиваются.**

Нетрудно выяснить, как намагничивается кусок стали, какую он приобретает полярность, если к нему поднести постоянный магнит. Для этого проделаем такой опыт. Возьмем кусок стальной проволоки и к одному из ее концов прикоснемся северным полюсом магнита так, чтобы проволока намагнитилась. Если теперь к концу ее, соприкасавшемуся с северным полюсом магнита, приблизить компас, то его стрелка повернется к испытуемому концу также своим северным полюсом. Это доказывает, что на том конце

проволоки, который соприкасался с северным полюсом магнита, образовался южный полюс.

Наш земной шар, как уже говорилось, подобен магниту с южным магнитным полюсом, расположенным возле северного географического полюса, и с северным магнитным полюсом, находящимся у южного географического полюса[1]. Северный полюс стрелки компаса притягивается южным магнитным полюсом земли, находящимся на севере (фиг. 3).



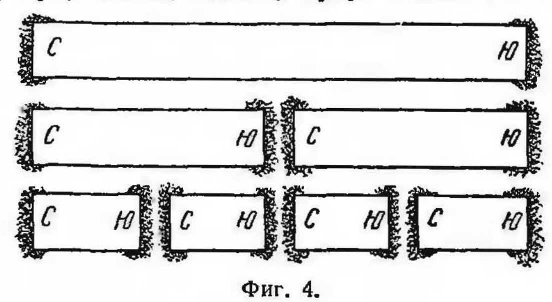
Фиг. 3.

Возьмем длинный тонкий магнит, изготовленный из стальной проволоки или ленты (фиг. 4), и попробуем отделить в нем северный полюс от южного. Если, разделив магнит на две части, мы посредством компаса проверим, что произошло с его полюсами, то обнаружим, что каждая его половина также имеет оба полюса — северный и южный; при этом полюса будут расположены так, как указано на фиг. 4 (подробнее об этом см. гл. 2). Сколько бы мы ни делили магнит, любая часть его будет иметь оба полюса: получить магнит только с одним каким-либо полюсом невозможно. К этому обстоятельству мы

[1] Следует отметить, что магнитные полюса земли не совпадают с географическими: южный магнитный полюс находится на 70°30′ северной широты и 97°41′ восточной долготы, а северный магнитный полюс — на 73°39′ южной широты и 145°15′ западной долготы.

вернемся еще при рассмотрении строения намагничивающихся тел.

Не все тела одинаково ведут себя по отношению к магниту. Если мы подвесим на легких шелковинках небольшие шарики из разных материалов, то увидим, что некоторые из них (сталь, чугун, никель, алюминий, кобальт, хром) притянутся, хотя и с разной силой, как северным, так и южным полюсом магнита, в то время как другие (висмут, цинк, медь, серебро, золото, свинец) будут отталкиваться от обо-



Фиг. 4.

их полюсов. Тела, притягивающиеся магнитом, называют **парамагнитными**, а отталкивающиеся — **диамагнитными**.

Большинство тел сравнительно слабо притягивается к магниту или отталкивается от него, и их притяжение и отталкивание могут быть обнаружены только в обстановке лабораторного опыта при помощи достаточно чувствительных методов. Но есть группа тел — металлы, у которых магнитные свойства выражены весьма сильно, значительно сильнее, чем у других тел: железо (и большинство его сплавов, в том числе сталь), никель и кобальт. Эти металлы находятся в одном ряду и в одной группе периодической системы элементов Менделеева и обладают многими одинаковыми физическими и химическими свойствами. Эта группа с резко выраженными магнитными свойствами носит общее название группы **ферромагнитных металлов** (от латинского ferrum — железо). Ферромагнитные металлы и сплавы (иначе называемые ферромагнетиками) в технике сильного и слабого токов, в том числе в радиотехнике, нашли исключительно широкое применение; поэтому в дальнейшем изложении мы еще не раз вернемся к изучению их особых магнитных свойств.

ГЛАВА ПЕРВАЯ
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МАГНЕТИЗМА
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Положим небольшой гвоздь на стекло или гладкий картон и начнем медленно со стороны приближать к нему магнит. Уже на некотором расстоянии гвоздь начнет отзываться на приближение магнита, поворачиваясь и следуя за его движением. Если, оставив гвоздь на стеклянной пластинке, мы станем приближать магнит снизу под стеклом, то, несмотря на то, что между магнитом и гвоздем будет находиться стекло, влияние магнита на гвоздь скажется так же, как если бы никакого тела между ними не было. Гвоздь, скользя по стеклу, будет следовать за всеми движениями магнита. Мы видим, что магнит уже на расстоянии действует на гвоздь с какой-то силой. Точно так же с известной силой магнит будет действовать на магнитные полюса всякого другого магнита, расположенного на некотором расстоянии от первого. Величина и направление той силы, с которой данный магнит действует на какой-либо полюс другого магнита, в различных точках пространства различна. Очень важно знать, каковы именно величины и направление этой силы в разных точках пространства вокруг магнитов различного типа.

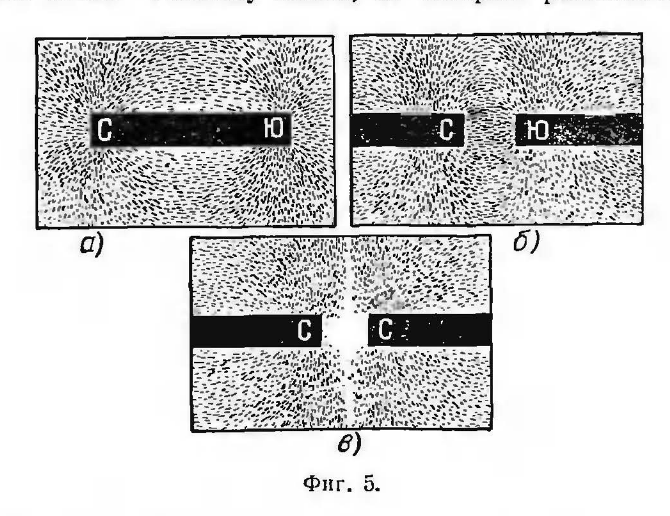
Чтобы разобраться в этом вопросе, проделаем такой опыт: оставим магнит под стеклом и, убрав гвоздь, посыпем стекло опилками из мягкой стали. Чтобы они падали равномерно, их следует брать возможно более мелкими и просеивать с некоторой высоты на стекло сквозь сито. Под влиянием магнита опилки расположатся на стекле в определенном порядке, образуя своеобразный характерный рисунок, иногда называемый магнитным спектром (фиг. 5,*а*) [1].

---

[1] Полученный рисунок можно сфотографировать или закрепить покрыв его при помощи пульверизатора каким-либо жидким клеящим веществом, например гуммиарабиком. Если опыт производится не на

Если вместо одного магнита поместить под стекло разноименные полюса двух разных магнитов или полюса подковообразного магнита, то получившийся из опилок рисунок (фиг. 5, *б*) ясно покажет множество линий, соединяющих между собой полюса.

Направление линий, образованных опилками, в каждой точке совпадает с направлением тех магнитных сил, которые действовали бы на магнитный полюс, помещенный в этой точке. Поэтому линии, по которым располагаются



Фиг. 5.

опилки, называют **магнитными силовыми линиями.**

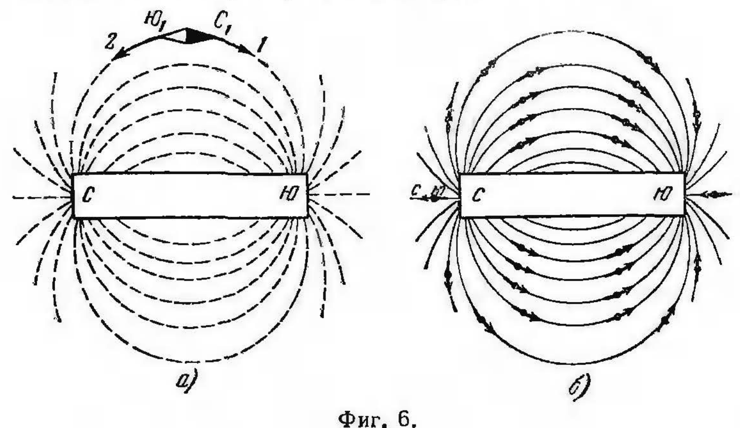
На фиг. 5, *в* показан магнитный спектр, образованный двумя одноименными полюсами. В то время как при разноименных полюсах силовые линии, выходя из северного полюса, входили в южный и соединяли их между собой, при одноименных полюсах пучки силовых линий каждого полюса не соединяются между собой, а, как бы отталкиваясь друг от друга, идут к своим разноименным полюсам.

Глядя на силовые линии, мы можем указать направление, в котором действовала бы сила магнита на какой-либо

стекле, а на картоне (или бумаге), то последний предварительно следует жирно пропарафинировать и после получения рисунка осторожно, не встряхивая, нагреть. Парафин, расплавясь, свяжет между собой опилки и после остывания закрепит их в нужном положении.

магнитный полюс, помещенный в данной точке. Более того, глядя на картину, образованную опилками, мы сможем вывести известные заключения и о величине этой силы, ибо, как оказывается, магнитная сила больше там, где силовые линии расположены гуще, и слабее там, где они расположены реже.

Таким образом, магнитные силовые линии сразу дают *наглядную и достаточно полную картину распределения* магнитных сил в пространстве вокруг магнита.



Фиг. 6.

Условлено считать, что вне магнита все магнитные силовые линии выходят из северного полюса и входят в южный. Выбранное так направление силовых линий совпадает с направлением силы, действующей на северный полюс какого-либо магнита. По этому направлению, отталкиваясь от одноименного северного полюса и притягиваясь южным, двигался бы какой-либо отдельный северный полюс, если бы он мог существовать самостоятельно без южного.

Из всего сказанного легко вывести заключение о том, как будет вести себя маленькая подвижная магнитная стрелка, расположенная вблизи какого-либо магнита. Действительно, представим себе подвижную магнитную стрелку $C_1Ю_1$, расположенную так, как указано на фиг. 6,*а*. Мы уже знаем, что на ее северный полюс будет действовать сила, направленная по силовой линии, проходящей через точку C_1, а на южный полюс — сила, направленная навстречу направлению силовой линии, проходящей через точку $Ю_1$. Эти две силы, изображенные на фиг. 6,*а* соответственно стрелка-

ми *1* и *2*, повернут магнитную стрелку по направлению силовой линии. Следовательно, если бы мы расположили ряд легких магнитных стрелок вокруг постоянного магнита, то они установились бы вдоль силовых линий так, как указано на фиг. 6,*б*.

Магнитные силовые линии не расположены в одной какой-либо плоскости, а занимают определенное пространство вокруг магнита, расходясь дугообразно от его полюсов.

Все пространство вокруг магнита, в котором проявляются его магнитные силы, называется магнитным силовым полем, или просто магнитным полем. Представление о силовых линиях вводится в физику для облегчения понимания электрических и магнитных полей. Под силовыми линиями следует понимать воображаемые линии, в направлении которых действуют в каждой данной точке магнитные (или электрические) силы.

Магнитное силовое поле постоянных магнитов по расположению силовых линий весьма напоминает электрическое поле. Если в жидкий диэлектрик (вазелин, масло), к которому подмешано некоторое количество кристаликов хинина или асбеста, погрузить металлические электроды, сообщив им электрические заряды (например от электростатической машины), то кристалики, расположившись по направлению электрических силовых линий, создадут рисунок электрического поля, весьма сходный с рисунком магнитного поля.

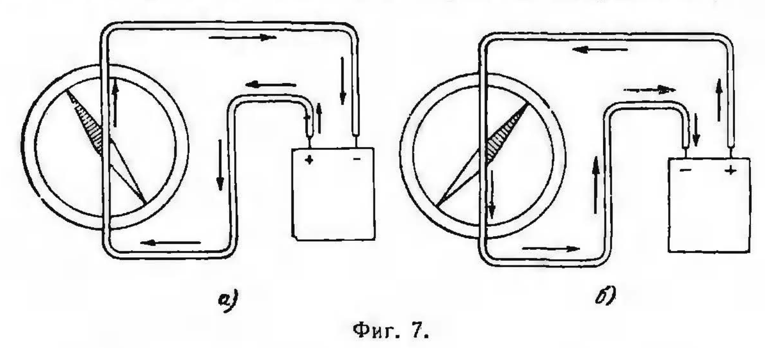
Электрические и магнитные поля распространяются от места возникновения со скоростью около 300 000 *км/сек*. Так распространяются в пространстве свет и электромагнитные радиоволны. Эта скорость так велика, что появление магнитных полей при возникновении их причины можно считать мгновенным.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

Между магнитными и электрическими явлениями существует глубокая и тесная связь. Эта связь прежде всего выражается в том, что всякий электрический ток сопровождается магнитными явлениями.

Проделаем следующий опыт: установив компас в горизонтальном положении так, чтобы стрелка могла свободно двигаться, положим на компас кусок проволоки и подведем ее концы к какому-либо источнику постоянного тока — ак-

кумулятору или гальванической батарее напряжением 3—5 *в*. Проволоку надо расположить над стрелкой и параллельно ей, после того как она успокоится и установится в определенном положении. Если теперь через проволоку пропустить ток, то в момент включения стрелка компаса отклонится в сторону и останется в таком положении до тех пор, пока по проволоке будет течь электрический ток (фиг. 7,*а*). Как только ток прекратится, стрелка снова вернется в прежнее положение. Если, поменяв концы проволоки местами, пропустить ток в обратном направлении, то



Фиг. 7.

стрелка также отклонится, но в иную, чем первый раз, сторону (фиг. 7,*б*).

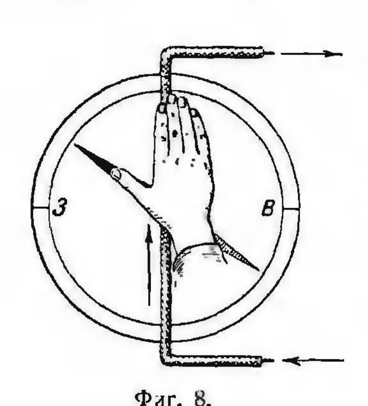
Мы видим, что при движении тока по проводнику вокруг последнего возникают магнитные силы, т. е. появляется магнитное поле. Под влиянием этого поля происходит отклонение стрелки компаса, причем изменение направления тока вызывает изменение направления магнитных сил: стрелка отклоняется то в одну, то в другую сторону в зависимости от направления тока.

Существует так называемое п р а в и л о п р а в о й р у к и, которое позволяет определить, в какую сторону отклонится стрелка компаса при пропускании тока через расположенный над ней проводник.

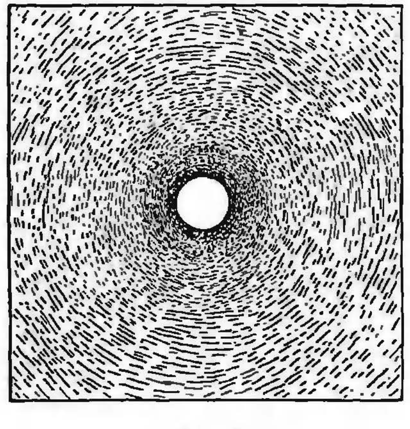
Если положить правую руку на проводник ладонью вниз так, чтобы направление четырех пальцев совпало с направлением тока, то большой палец укажет направление отклонения северного полюса стрелки (фиг. 8).

Пользуясь стальными опилками, так же как и в случае постоянных магнитов, можно выяснить характер магнитного поля в пространстве вокруг проводника с током.

Возьмем кусок картона и, продев медную проволоку сквозь отверстие в его середине, пропустим по проволоке ток. Если теперь насыпать на картон опилки, то они расположатся в виде концентрических колец с центром, совпадающим с осью проводника (фиг. 9). Это позво-



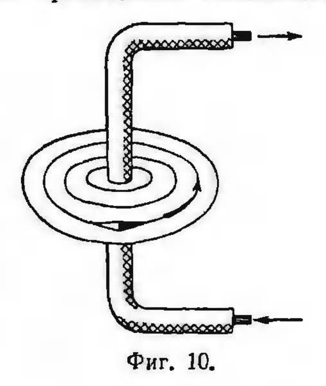
Фиг. 8.



Фиг. 9.

ляет заключить, что силовые линии представляют собой концентрически замкнутые окружности

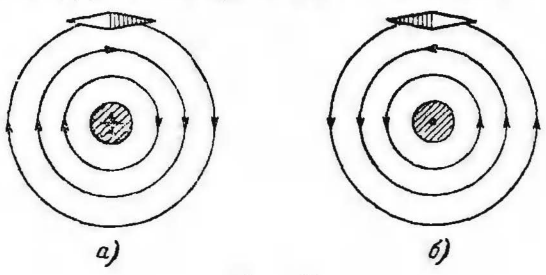
Направление силовых линий можно определить посредством компаса, внесенного в поле проводника. Положение стрелки покажет направление силовых линий магнитного поля (фиг. 10) точно так же, как это было при определении направления силовых линий постоянного магнита, выходящих из северного и входящих в южный полюс (фиг. 6).



Фиг. 10.

Существует п р а в и л о ш т о п о р а, позволяющее определить направление магнитного поля вокруг проводника в зависимости от направления протекающего по нему тока: если вращать штопор так, чтобы он ввинчивался по направлению тока, то направление вращения ручки совпадет с направлением силовых линий.

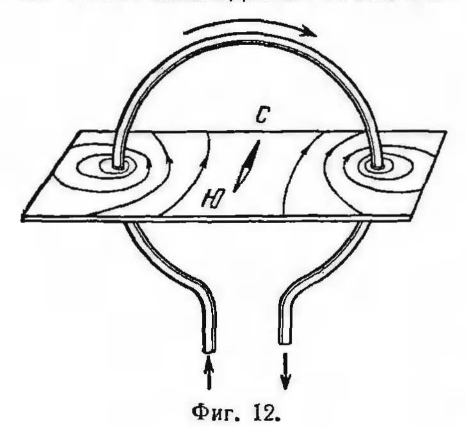
Условимся относительно обозначений. Направление обычно обозначается стрелкой: если стрелку представить себе летящей на нас, то мы увидим ее острие в виде точки (·); если же, наоборот, стрелка летит от нас, то мы увидим ее оперение (+). Поэтому, когда хотят обозначить движе-



Фиг. 11.

ние от наблюдателя вглубь чертежа, ставят знак +, а при движении от чертежа на наблюдателя — точку.

На фиг. 11,*а* показан разрез проводника, по которому течет ток от наблюдателя за плоскость чертежа. Если в центре проводника установить штопор и вращать его так, чтобы он входил вглубь чертежа, то направление концов рукоятки штопора (в данном случае по часовой стрелке) покажет нам направление силовых линий.

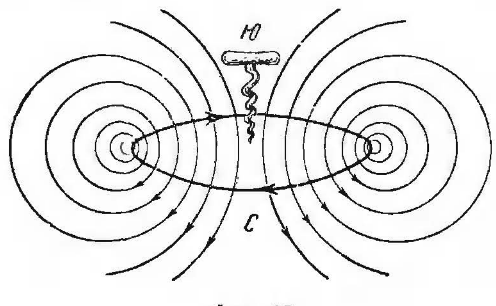


Фиг. 12.

Направление поля изменяется с изменением направления тока. Направлению тока из-за плоскости чертежа на наблюдателя будет соответствовать вывинчивание штопора, причем направление вращения концов его ручки снова покажет нам изменившееся направление силовых линий поля (фиг. 11,*б*).

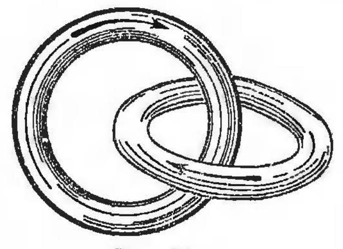
Согнем проводник с током так, чтобы он образовал незамкнутый виток, и посмотрим, каково будет магнитное поле вокруг проводника.

Согласно правилу штопора при указанном на фиг. 12 направлении тока силовые линии будут уходить из середины витка за плоскость чертежа, а возвращаться обратно вне витка. При рассмотрении поля постоянного магнита мы



Фиг. 13.

условились, что линии выходят из северного полюса. Поэтому та сторона витка, из которой линии выходят, будет соответствовать северному полюсу постоянного магнита. Действительно, стрелка поднесенного компаса повернется к витку своим южным полюсом (разноименные полюса притягиваются).



Фиг. 14.

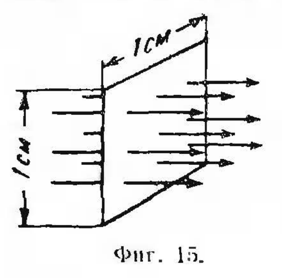
Определив с помощью компаса направление силовых линий, создаваемых круговым током, мы можем, пользуясь тем же правилом штопора, определить направление тока: если придать штопору поступательное движение в направлении силовых линий, то его ручка, вращаясь, покажет нам направление тока (фиг. 13).

Следовательно, направления электрического тока и создаваемого им магнитного поля связаны между собой таким образом: *если придать штопору поступательное движение по направлению тока, то вращение ручки покажет направление магнитного поля, и, наоборот, если штопору придать движение по ходу силовых линий, то вращение ручки покажет направление тока.*

На фиг. 14 показано взаимное направление электрического тока и образованного им магнитного поля. Какое из изображенных колец принять за ток и какое за поток силовых линий, безразлично.

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

В цепь между источником тока и витком проволоки включим реостат так, чтобы при его помощи можно было регулировать силу проходящего по витку тока. Затем, приблизив компас к середине плоскости витка, начнем перемещать ползунок реостата, постепенно уменьшая его сопротивление и увеличивая ток. Вначале стрелка компаса лишь немного отклонится от своего положения, но по мере увеличения тока отклонение ее будет все увеличиваться, пока она не повернется перпендикулярно к плоскости витка.



Фиг. 15.

Действие тока на стрелку тем сильнее, чем сильнее его магнитное поле. Следовательно, наш опыт позволяет утверждать, что *чем больше сила протекающего тока, тем больше создаваемое им магнитное поле*. До тех пор, пока мы имеем дело с магнитными полями в «пустоте» или в воздухе, магнитный поток прямо пропорционален силе тока, протекающего по витку.

Сила, с которой поле действует на стрелку компаса, определяется количеством созданных током силовых линий. Эта сила, обозначаемая буквой *H*, называется *напряженностью магнитного поля* и выражается в *эрстедах* (сокращенное обозначение *э*).

Напряженность магнитного поля можно характеризовать густотой силовых линий: чем больше линий проходит через единицу перпендикулярной к ним площади, тем больше напряженность магнитного поля в данном месте. При напряженности поля в 1 *э* на 1 *см*² поперечного сечения поля приходится 1 силовая линия. Следовательно, можно сказать, что *напряженность магнитного поля есть число силовых линий, приходящихся на 1 см² поперечного сечения поля* (фиг. 15).

Общее число магнитных силовых линий, создаваемых постоянным магнитом или электрическим током, называется

магнитным потоком и обозначается буквой Ф. Магнитный поток измеряется единицами, носящими название максвелл и обозначаемых *мкс*.

При внесении в магнитное поле ферромагнитного тела, например, куска мягкой стали, в нем индуктируется магнитный поток. Возникновение магнитного потока и магнитных свойств в теле при внесении его в магнитное поле мы назвали магнитной индукцией. При однородном магнитном поле индукция измеряется числом силовых линий, приходящихся на 1 $см^2$ перпендикулярной к силовым линиям площади поперечного сечения внесенного в магнитное поле тела. В случае же неоднородного магнитного поля густота линий будет характеризоваться отношением числа силовых линий, проходящих через какую-либо малую площадку (например, 1 $мм^2$), расположенную перпендикулярно к силовым линиям, к величине этой площадки.

Таким образом, магнитной индукцией называется плотность магнитного потока, т. е. количество силовых линий, приходящихся на 1 $см^2$ перпендикулярной к потоку площади поперечного сечения внесенного в магнитное поле тела. Магнитная индукция измеряется единицами, носящими название гаусс и обозначаемых *гс*. Гаусс — это такая индукция, при которой на 1 $см^2$ сечения тела приходится магнитный поток, равный 1 *мкс*.

Если магнитный поток образован однородным полем, в котором силовые линии параллельны и расположены с постоянной густотой, то величина магнитной индукции определится следующим образом:

$$B = \frac{\Phi}{Q},$$

где B — магнитная индукция, *гс*;

Φ — магнитный поток, *мкс*;

Q — площадь поперечного сечения потока, $см^2$.

Для «пустоты» и, с известной степенью приближения, для воздуха, в которых под влиянием внешнего поля не возникает новых силовых линий, магнитная индукция численно равна напряженности магнитного поля и его можно выразить как индукцией в гауссах, так и напряженностью в эрстедах. Когда же в магнитное поле магнита или тока вносится какое-либо тело, создающее свой собственный магнитный

поток, то результирующее магнитное поле измеряется индукцией. Диамагнитное тело при внесении в магнитное поле создает собственный магнитный поток, направленный навстречу внешнему полю, и поэтому ослабляет его. Собственный поток помещенного во внешнее поле парамагнитного тела совпадает по направлению с внешним полем и поэтому усиливает его. При внесении в магнитное поле ферромагнитных тел начальный магнитный поток увеличивается в сотни и тысячи раз. Подробнее этот вопрос разобран в гл. 2.

Магнитный поток при однородном магнитном поле может быть выражен произведением индукции на площадь поперечного сечения:

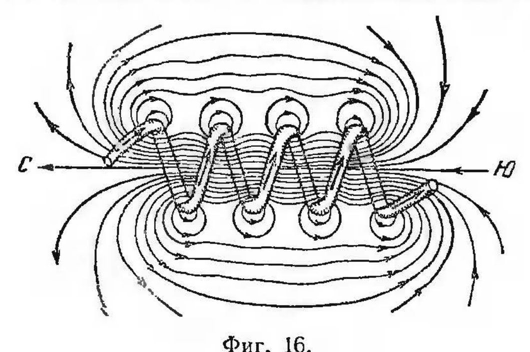
$$\Phi = BQ.$$

При индукции $B = 100$ *гс* и площади поперечного сечения поля $Q = 5$ *см*^{2} магнитный поток равен:

$$\Phi = 100 \cdot 5 = 500 \text{ мкс.}$$

СОЛЕНОИД

Если проводник свернуть спиралью, то мы получим так называемый соленоид, который можно рассматривать как совокупность соединенных последовательно витков. Ток по



Фиг. 16.

виткам соленоида проходит в одном и том же направлении; в силу этого направление магнитных силовых линий всех витков совпадает, и линии, соединяясь вместе, образуют общий магнитный поток (фиг. 16).

При прохождении по одному витку ток создает магнитный поток определенной величины; магнитный поток нескольких витков соленоида будет больше, так как силовые

линии этих витков, совпадая по направлению, складываются и образуют общий поток. Таким образом, мы видим, что магнитный поток и, следовательно, магнитная индукция прямо пропорциональны числу витков соленоида. Но при рассмотрении поля одного витка мы указали, что величина магнитного потока отдельного витка пропорциональна силе протекающего по витку электрического тока. Следовательно, мы можем сказать, что величина магнитного потока соленоида прямо пропорциональна силе протекающего тока и количеству витков, т.е.

$$\Phi = kIw,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Иначе эту зависимость можно изобразить следующим образом:

$$\Phi = \frac{0,4\pi Iw}{R_m},$$

где Φ — магнитный поток, создаваемый соленоидом;

I — сила протекающего по соленоиду тока, *а*;

w — число витков соленоида;

$0,4\pi$ — коэффициент размерности, позволяющий выразить магнитный поток числом силовых линий;

R_m — некоторый постоянный для данной катушки множитель, так называемое магнитное сопротивление, которое подобно сопротивлению проводника электрическому току зависит от длины пути магнитного потока и от площади его поперечного сечения.

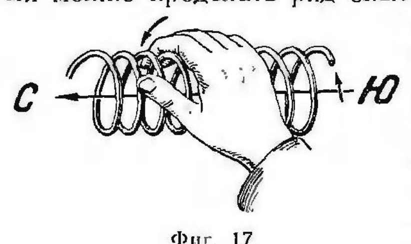
Произведение Iw (силы тока в амперах на количество витков), называемое ампервитками, в расчетах магнитных цепей играет существенную роль; оно, между прочим, показывает, что одну и ту же величину магнитного потока можно получить в соленоиде с небольшим числом витков при большой силе тока, либо в соленоиде с большим числом витков при малой силе тока. Необходимо только, чтобы произведения Iw в обоих случаях были равны (конечно, при условии, что форма соленоида подобрана в обоих случаях соответствующим образом и что магнитные сопротивления цепей в обоих соленоидах одинаковы). Так, например, магнитный поток соленоида в 20 витков при силе

тока в 5 *а* будет равен магнитному потоку соленоида в 100 витков при силе тока в 1 *а*, так как в обоих случаях произведение *Iw* равно 100 *aw*.

Направление магнитного поля соленоида, так же как и в случае одного витка, связано с направлением тока и может быть определено при помощи правила штопора.

Легко запоминаемое правило, позволяющее определить положение магнитных полюсов соленоида в зависимости от направления тока, заключается в следующем: если положить правую руку на соленоид так, чтобы четыре пальца совпали с направлением тока в витках, то большой палец укажет на северный полюс (фиг. 17).

Для дальнейшего ознакомления с магнитными явлениями можно проделать ряд опытов. При этом, чтобы определить характер сил взаимодействия между токами, примем во внимание следующее. Силы взаимодействия всегда таковы, что силовые линии как бы стремятся сократиться в длину; вместе с тем силовые линии одного направления как бы стремятся оттолкнуться друг от друга, а линии различных направлений притягиваются друг к другу.



Фиг. 17.

Подвесим параллельно друг другу два гибких проводника и пропустим через них постоянный ток, первый раз так, чтобы он шел по обоим проводникам в одном направлении, а второй раз — в противоположных.

Посмотрим, как расположатся магнитные поля проводников в обоих случаях.

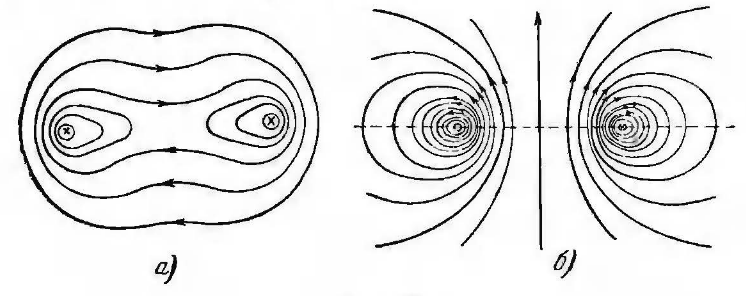
В первом случае, когда ток течет в обоих проводниках в одном направлении, магнитные поля их также будут иметь одно направление; силовые линии каждого проводника соединятся вместе, образуя ряд замкнутых линий, обнимающих и как бы стягивающих проводники друг с другом (фиг. 18,*а*).

Действительно, при токах одного направления проводники притягиваются. Наоборот, если пропустить ток по проводникам в разных направлениях, то и магнитные поля их будут разных направлений. Силовые линии расположатся так, как указано на фиг. 18,*б*, между проводниками гуще,

чем извне. Линии одинакового направления будут отталкиваться и проводники также оттолкнутся.

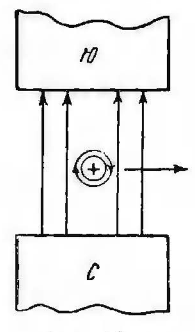
Рассмотрим взаимодействие магнитного поля, образуемого током, с полем постоянного магнита.

Пусть *С* и *Ю* (фиг. 19) — северный и южный полюса магнита, в поле которого помещен проводник. Предположим, что ток идет от наблюдателя за плоскость чертежа; тогда поле тока будет иметь направление по часовой стрелке. По левую сторону от проводника оно будет совпадать



Фиг. 18.

по направлению с полем магнита, а по праву пойдет навстречу — ослабит его.



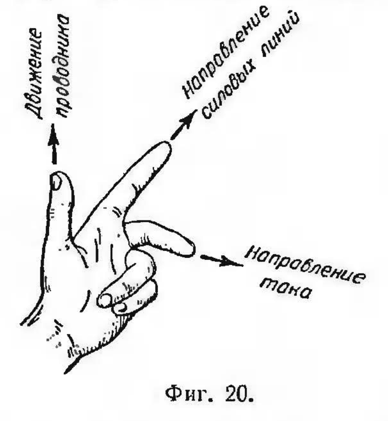
Фиг. 19.

В результате отталкивания между одинаково направленными линиями и притяжения между линиями, направленными в противоположные стороны, проводник будет стремиться переместиться вправо.

Для определения направления, по которому перемещается проводник под действием магнитных полей тока и постоянного магнита, существует правило левой руки: если сложить три пальца левой руки так, чтобы указательный палец показывал направление силовых линий магнита, а средний — направление тока в проводнике, то большой палец левой руки укажет направление, по которому проводник будет выталкиваться из междуполюсного пространства (фиг. 20).

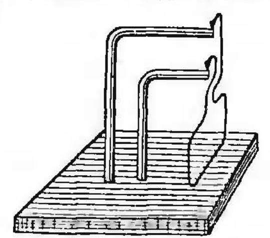
Для иллюстрации сказанного выше может служить станок, изображенный на фиг. 21. Загнем концы провода

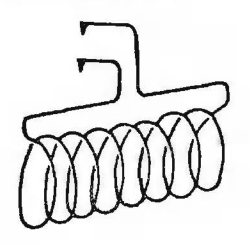
соленоида и вставим его в чашечки, укрепленные на концах двух стоек так, чтобы соленоид мог легко вращаться. Для лучшего электрического контакта в чашечки нальем ртуть. Если теперь через стойки подвести к подвешенному соленоиду ток, то можно заметить, что соленоид под влиянием магнитного поля земли подобно магнитной стрелке компаса повернется и станет по линии север — юг.



Фиг. 20.

С помощью правила штопора определим положение полюсов подвешенного соленоида и поднесем к одному из концов соленоида постоянный магнит попеременно обоими полюсами. Мы увидим, как и в случае с двумя постоянными магнитами, что одноименные полюса оттолкнутся, а разноименные — притянутся (соленоид повернется вокруг своих точек опоры). При отсутствии станка опыт можно несколько видоизменить, подвесив две небольшие катушки параллельно друг другу и меняя в одной из них направление тока.





Фиг. 21.

Таким образом, мы видим, что магнитное поле тока ведет себя так же, как и поле постоянного магнита, и подчиняется тем же законам.

Если к соленоиду с током поднести кусок мягкой стали, то, как и в случае с постоянным магнитом, сталь намагнитится и сама станет магнитом. При этом на ближайшем к соленоиду конце куска стали образуется магнитный полюс знака, противоположного тому, какой был у ближай-

шего полюса соленоида. Например, если сталь поднести к северному полюсу соленоида, то на конце ее, обращенном к соленоиду, образуется южный полюс, и наоборот. Так как разноименные магнитные полюса притягиваются, то внесенный в поле соленоида кусок стали будет втягиваться внутрь соленоида до тех пор, пока не займет симметричное положение по отношению к его концам. Это явление будет иметь место независимо от того, к какому концу соленоида поднесена сталь и каково направление тока в соленоиде.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

СТРОЕНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ТЕЛ

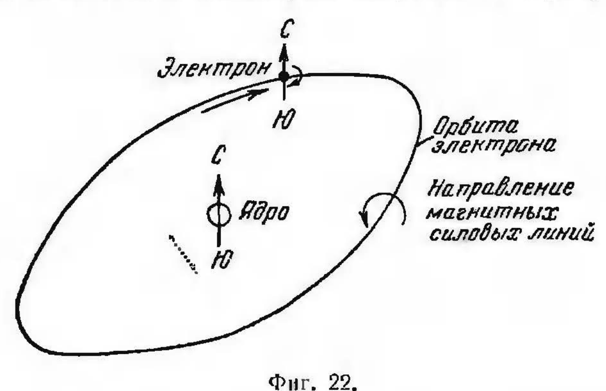
Современная наука о строении вещества позволяет внести некоторую ясность в наше представление о строении намагничивающихся тел. Мы знаем, что всякое вещество построено из атомов, представляющих собой систему, состоящую из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него по различным орбитам электронов. Движение электронов вокруг ядра, как и всякое движение электрических зарядов, может быть уподоблено электрическому току, а всякий ток, как мы уже знаем, создает вокруг себя магнитное поле. Таким образом, всякий движущийся электрон подобно рассмотренному нами круговому току в витке должен создавать магнитное поле. Кроме движения по орбите электрон вращается еще вокруг своей оси. В результате этого вращения также создается магнитное поле, которое в магнитных явлениях играет главную роль (фиг. 22).

Атомы различных элементов имеют различное количество вращающихся вокруг ядра электронов. Их число определяется величиной положительного заряда ядра. Атом водорода имеет один электрон, атом урана — самого тяжелого из обнаруженных на земле естественных элементов — имеет 92 электрона.

Орбиты и оси вращения отдельных электронов могут находиться в различных положениях друг к другу; в таких же относительных положениях будут находиться и создаваемые движущимися электронами магнитные поля, которые в зависимости от их взаимного расположения будут частич-

но или полностью складываться или вычитаться. В итоге атом может обладать каким-то результирующим магнитным полем или может не иметь его. Об атомах, имеющих магнитное поле, говорят, что они «обладают магнитным моментом», о прочих атомах говорят, что они «не имеют магнитного момента».

Известный французский физик коммунист Поль Ланжевен (1872—1946) показал, что атомы всех веществ при попадании в постороннее магнитное поле начинают вращаться вокруг направления этого поля с огромной скоростью, совершая миллионы и миллиарды оборотов в секунду, в за-



Фиг. 22.

висимости от величины поля. При этом каждый атом с ядром и электронной оболочкой вращается как одно целое — взаимное расположение электронных орбит и осей в нем не изменяется.

Такие атомы благодаря своему вращательному движению приобретают магнитный момент, причем направление возникшего магнитного поля, определяемое направлением вращения атома, всегда будет противоположно направлению поля, в котором вращается атом. На фиг. 23 направление магнитного поля, возникшего вследствие вращения атома, показано пунктирной стрелкой.

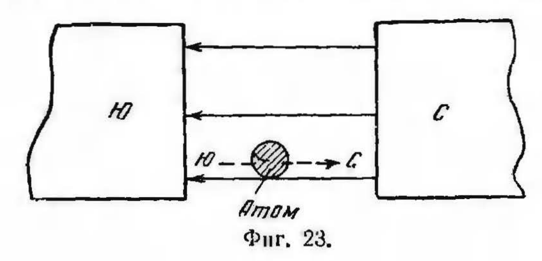
При неоднородности поля, в котором вращается атом, взаимодействие его с направленным ему навстречу полем атома приведет к выталкиванию атома из этого постороннего поля, т. е. к проявлению диамагнитного эффекта.

Диамагнитный эффект имеет место у всех без исключения веществ — диамаг-

нитных, парамагнитных и ферромагнитных.

Если атом до внесения его в магнитное поле не обладал магнитным моментом, то кроме появления небольшого диамагнитного эффекта с ним больше ничего не происходит, и мы можем сказать, что вещества, атомы которых не имеют магнитного момента, являются диамагнитными веществами.

Если же атом обладает собственным магнитным моментом, то при внесении его в постороннее магнитное поле, кроме возникновения диамагнитного момента, произойдет еще переориентировка магнитного поля атома, которое бу-



Фиг. 23.

дет стремиться повернуться вдоль внешнего поля. Так как при этом направления поля атома и внешнего поля будут совпадать, то атом будет испытывать втягивающее действие внешнего поля, т. е. будет иметь место парамагнитный эффект.

Следует, однако, иметь в виду, что вследствие теплового движения атомов лишь небольшому их количеству удастся сориентироваться в направлении внешнего поля, основная же масса атомов останется в хаотическом состоянии, что определяет собой небольшую величину парамагнитного эффекта.

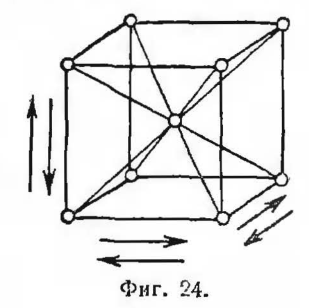
Таким образом, при попадании во внешнее магнитное поле атома, обладающего собственным магнитным моментом, будут иметь место и диамагнитный и парамагнитный моменты. Но так как парамагнитный момент все же больше диамагнитного, то такой атом будет вести себя как парамагнитное тело.

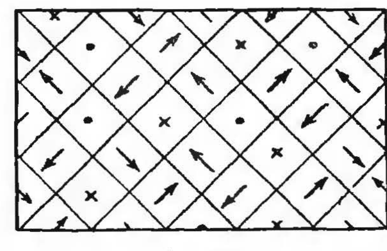
Подводя итоги, мы можем сказать, что диамагнитным эффектом обладают все вещества, а парамагнитным только вещества, атомы

которых обладают собственным магнитным моментом.

Что касается ферромагнитных веществ, то картина магнитных явлений там значительно сложнее. В упрощенном виде она может быть представлена следующим образом.

Атомы расположены в веществе в определенном порядке; в железе, например, кристаллы которого имеют форму куба, атомы расположены так, как показано на фиг. 24. Опыт показал, что намагничивание железа легче всего про-


Фиг. 24.


Фиг. 25.

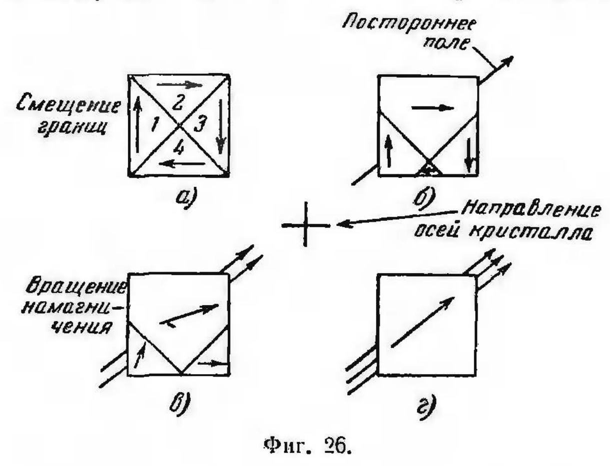
исходит в одном из шести направлений, параллельных осям кристалла, которые называются «направлениями легкого намагничения» (на фиг. 24. показаны стрелками).

Ферромагнитные тела состоят из большого количества мелких областей, имеющих толщину порядка 0,1 *мм* и остальные размеры от 1 до 10 *мм*, которые в силу внутренних причин всегда намагничены до насыщения при полном отсутствии какого-либо внешнего поля. Это так называемые области спонтанного (самопроизвольного) намагничения или домены, всегда намагниченные в направлении легкого намагничения. Направления намагничения различных областей ненамагниченного ферромагнитного тела распределяются равномерно между шестью указанными выше направлениями, в силу чего внешне тело не проявляет никакого намагничения (фиг. 25 «+» — направление от наблюдателя, а «.» — на наблюдателя).

Если ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле, то все намагниченные области повернутся в направлении этого поля — тело намагнитится, причем это намагничивание будет происходить в два этапа На первом этапе с ростом напряженности внешнего поля будет происходить рост тех областей, направление намаг-

ничения которых будет ближе всего к направлению внешнего поля. Прочие же области будут уменьшаться до тех пор, пока почти все тело не окажется намагниченным в одном направлении, самом близком к направлению намагничивающего поля. Первый этап намагничивания — этап «смещения границ» на этом заканчивается.

Если напряженность внешнего поля будет продолжать расти, то наступит второй этап — этап «вращения намагничения», при котором направление намагничения ферромагнитного тела будет поворачиваться по направлению внешнего поля до полного совпадения этих направлений. Тело окажется намагниченным до насыщения.

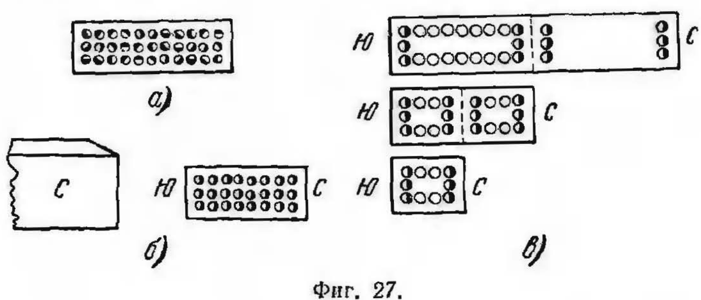


Фиг. 26.

На фиг. 26 показан участок кристалла ферромагнитного тела. Знак + показывает направления осей кристалла, большие стрелки—направление внешнего намагничивающего поля, количество стрелок, пересекающих кристалл, — относительную величину напряженности этого поля. Цифрами *1*, *2*, *3*, *4* на фиг. 26,*а* обозначены области спонтанного намагничения, направление намагничения которых таково, что магнитные поля их замыкаются внутри, и во внешнем пространстве кристалл не создает почти никакого магнитного поля. На фиг. 26,*б* показано смещение границ областей спонтанного намагничения под влиянием постороннего магнитного поля. На фиг. 26,*в* показано, как при усилении постороннего поля отдельные области кристалла начинают изменять направление своего намагничения в сторону это-

го поля (вращение намагничения). Наконец, на фиг. 26,*г* показан окончательный результат воздействия внешнего поля — весь кристалл намагнитился в направлении внешнего поля и сам стал магнитом.

Исследования известного советского физика Акулова позволили не только подтвердить опытом существование областей спонтанного намагничения, но и увидеть их. Во время опытов находившийся под микроскопом образец покрывался тонким слоем взвешенной в керосине мельчайшей железной пыли, которая оказалась способной притягиваться ничтожным магнитным полем, существующим на границах между областями, позволяя определить их форму и размеры.



Фиг. 27.

Области спонтанного намагничения в ферромагнитных телах, самопроизвольно намагниченные до насыщения в одном направлении, могут рассматриваться как элементарные магнитики, которые могут изменять направление своего намагничения под влиянием постороннего поля. Если тело поднести к северному полюсу, то элементарные магнитики, повернуться к нему своими южными полюсами. П о э т о м у н а б л и ж а й ш е м к с е в е р н о м у п о л ю с у м а г н и т а к о н ц е п о д н е с е н н о г о т е л а о к а ж е т с я ю ж н ы й п о л ю с, а н а п р о т и в о п о л о ж н о м — с е в е р н ы й (фиг. 27,*а* и *б*).

Этим действием постороннего магнитного поля, ориентирующим элементарные магнитики тела, объясняется явление магнитной индукции, при котором под влиянием поднесенного магнита сталь намагничивается и приобретает способность притягивать опилки или при котором подвешенные к магниту кусочки стальной проволоки, намагничиваясь, удерживаются цепочкой.

Такое представление о строении намагничивающихся тел позволяет также понять, почему при делении магнита на части любой отломанный кусок его всегда будет иметь оба полюса — северный и южный (фиг. 27,*в*).

Так как соленоид, по которому протекает ток, ведет себя подобно магниту, то намагничивание куска стали можно производить, помещая его возле полюсов соленоида. Если кусок стали внести внутрь соленоида[1], то намагничивающее действие тока окажется сильнее, так как тогда кусок стали будет пронизываться всем магнитным полем, проходящим внутри соленоида, а не частью его.

Так как при помощи электрического тока можно получить значительно бо́льшие поля, чем от постоянного магнита, то намагничивание постоянных магнитов производят почти исключительно этим способом. Если форма магнита позволяет, то его помещают непосредственно в соленоид: если же форма сложна либо неудобна, то магнит обматывают изолированной проволокой, по которой пропускают ток иногда весьма значительной силы. Малые по размеру магниты для намагничивания помещают между полюсами мощного электромагнита. При намагничивании постоянных магнитов, изготовленных из специальных магнитных сплавов, ампервитки (произведение Iw) достигают весьма больших значений, порядка многих десятков тысяч. В процессе намагничивания полюса магнита для уменьшения сопротивления магнитному потоку замыкаются якорем — куском мягкой стали сечением в несколько (3—5) раз больше сечения магнита.

На элементарные магнитики действует к о э р ц и т и в н а я с и л а, аналогичная силе трения и затрудняющая как ориентировку элементарных магнитиков, так и возвращение их в исходное положение. Вследствие наличия коэрцитивной силы после исчезновения внешнего намагничивающего поля сталь размагничивается не полностью, а частично и в большей или меньшей степени сохраняет приобретенные ею магнитные свойства. В этом случае говорят, что в стали сохранился о с т а т о ч н ы й м а г н е т и з м.

Коэрцитивная сила определяется напряженностью магнитного поля, необходимого для полного размагничивания взятого материала, и поэтому также измеряется в эрстедах.

---

[1] Объем воздуха, заключенный внутри соленоида, называют иногда его „воздушным сердечником", а сталь, внесенную в соленоид, — „стальным сердечником".

Чем тверже сталь, тем больше ее коэрцитивная сила и тем большие усилия надо затратить на ориентировку элементарных магнитиков, но зато тем устойчивее они сохранят приданное им положение и тем лучше сохранится в них полученный магнетизм. Наоборот, в мягкой стали коэрцитивная сила невелика, и элементарные магнитики по прекращении действия внешнего магнитного поля сравнительно легко возвращаются в свое первоначальное положение. Поэтому для изготовления постоянных магнитов, которые должны сохранять свою силу длительное время, употребляют специальные сорта стали и особые сплавы, обладающие большой твердостью и большой коэрцитивной силой. Механические удары и сотрясения облегчают поворот элементарных магнитиков, поэтому к ним иногда прибегают при намагничивании стали в слабых полях, например, при намагничивании постоянным магнитом. Наоборот, уже намагниченные постоянные магниты охраняют от всяких сотрясений и ударов, так как при отсутствии намагничивающего поля эти удары способствовали бы возврату элементарных магнитиков в прежнее беспорядочное положение.

Если постоянный магнит поместить в постороннее магнитное поле с противоположным, чем у него, направлением силовых линий, то под действием этого поля элементарные магнитики начнут поворачиваться в другую сторону, и магнит станет размагничиваться. Поэтому намагниченные магниты следует оберегать от воздействия внешних магнитных полей.

При повышении температуры постоянного магнита тепловое движение его атомов и молекул увеличивается, они становятся более подвижными и при отсутствии внешнего ориентирующего поля элементарные магнитики могут вновь прийти в существовавшее до намагничивания хаотическое состояние — магнит размагнитится. Поэтому намагниченные магниты необходимо оберегать от нагрева.

У каждого ферромагнитного материала существует своя критическая температура, при которой его атомы и молекулы получают настолько большие колебания, что какое-либо ориентирование элементарных магнитиков с помощью внешнего поля становится невозможным, и материал теряет свои магнитные свойства. Такая критическая температура носит название точки магнитного превращения, или точки Кюри (для железа — 769° С).

При изготовлении постоянных магнитов большую подвижность молекул нагретой стали и специальных сплавов используют для того, чтобы сориентировать при намагничивании *возможно большее количество элементарных магнитиков* и получить, таким образом, от магнита наибольшее магнитное поле. Для этого заготовку магнита нагревают до высокой температуры и затем охлаждают в мощном постоянном магнитном поле. Такой способ намагничивания применяется для изготовления наиболее мощных постоянных магнитов.

ПРОНИЦАЕМОСТЬ

На основании изложенного выше мы можем заключить, что: 1) сталь, помещенная в магнитное поле, намагничивается; 2) намагнитившись, она, как и всякий магнит, создает свое (дополнительное) магнитное поле.

Вследствие этого, если мы поместим в соленоид сердечник из мягкой стали так, чтобы магнитные линии проходили через этот сердечник, то магнитный поток, создаваемый соленоидом, увеличится. Число, показывающее, во сколько раз увеличился магнитный поток при введении стального сердечника, называется коэффициентом магнитной проницаемости стали и обозначается греческой буквой μ (мю) [1].

Проницаемость воздуха можно считать равной единице; проницаемость диамагнитных тел меньше единицы; проницаемость парамагнитных тел больше единицы, но для тех и других тел (за исключением ферромагнитных) величины проницаемости близки к единице.

У ферромагнитных же тел, в частности у железа и стали, проницаемость в сотни и тысячи раз больше, чем у воздуха.

Существенная разница между ферромагнитными и другими телами заключается еще в том, что проницаемость последних есть величина почти постоянная при любых степенях намагничения, в то время как проницаемость ферромагнитных тел есть величина пере-

---

[1] Тела, которые имеют большее μ, дают больший магнитный поток. Эти тела, как бы легче проницаемые для силовых линий, представляют для них меньшее сопротивление. Отсюда термин „проницаемость".

менная, сильно меняющаяся в зависимости от степени намагничения. Это обстоятельство мы подробно разберем несколько позже.

Как уже указывалось, при увеличении тока, протекающего через соленоид без стального сердечника, полный поток силовых линий будет расти прямо пропорционально силе тока. Если же в соленоид вставить стальной сердечник, то картина резко изменится. Сначала при увеличении силы тока в сердечнике будет ориентироваться все большее и большее количество элементарных магнитиков, и индукция будет расти почти пропорционально росту напряженности намагничивающего поля. Но число элементарных магнитиков в стали ограничено. Чем больше магнитиков ориентировано, тем меньше остается неориентированных и тем медленнее с усилением внешнего поля растет число ориентированных магнитиков. Наконец, наступит момент, когда почти все элементарные магнитики уже будут ориентированы, сталь перестанет добавлять свое поле к внешнему полю, и дальнейшее увеличение потока будет происходить лишь за счет увеличения магнитного потока самого соленоида, т. е. будет очень незначительно. Когда достигнуто это состояние, то говорят, что наступило насыщение стального сердечника.

Если мы изобразим эти зависимости графически, то получим характерные кривые, которые позволяют легче разобраться в сущности рассматриваемых процессов и усвоить существующую между ними разницу.

Для изображения зависимости между двумя связанными между собой величинами обычно пользуются системой из двух взаимно перпендикулярных осей (оси координат). Если на горизонтальной оси (ось абсцисс) мы отложим возрастающие значения ампервитков (*aw*) или пропорциональной ампервиткам напряженности намагничивающего поля (фиг. 28), а на вертикальной (ось ординат) — величины индукции (*B*) и станем отмечать величину индукции в зависимости от ампервитков, то для соленоида без стали («с воздушным сердечником») мы получим прямую линию, или так называемую линейную зависимость (фиг. 28,*а*).

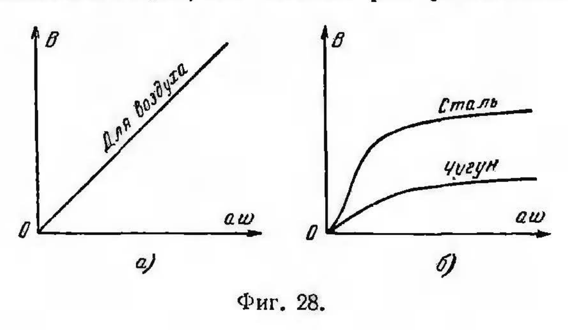
Если же в соленоид ввести стальной сердечник, то зависимость индукции от величины ампервитков представится в виде характерной кривой. При определенном для данного сорта стали значении ампервитков верхняя часть этой кривой загнется вправо и пойдет почти параллельно оси абсцисс (фиг. 28,*б*).

Если вместо стали взять чугун, то кривая сохранит общий характер; однако так как проницаемость чугуна значительно меньше проницаемости стали, то при тех же значениях ампервитков, что и для стали, чугун даст меньшую индукцию, и его кривая пойдет значительно ниже.

Таким образом, мы можем сказать, что в противоположность индукции в воздухе индукция в стали не пропорциональна ампервиткам и внешнему намагничивающему полю.

На основании приведенных объяснений можно сообразить, как будет меняться проницаемость стали в процессе намагничивания.

Проницаемость, как мы выше говорили, определяется числом, показывающим, во сколько раз увеличивается поток силовых линий магнитного поля при введении в него стали. Чем больше разница между потоком силовых линий в случае отсутствия стали и потоком при введенной стали, тем, следовательно, больше будет μ.



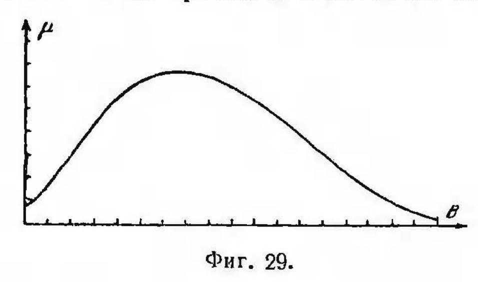
Фиг. 28.

При небольшой намагничивающей силе индукция как в воздухе, так и в стали будет не очень велика; не очень велика будет и разница между ними, μ будет также невелико. При увеличении намагничивающего поля индукция в воздухе будет расти пропорционально ему, в то время как индукция в стали возрастет значительно быстрее. Разница резко увеличивается, и μ быстро растет до своего максимального значения. Наконец, когда сталь доходит до насыщения, рост ее индукции прекращается, в то время как рост индукции в воздухе продолжается нормально. Разница между этими значениями индукции уменьшается, и величина μ начинает падать. Зависимость μ от индукции B показана на фиг. 29.

Эта зависимость проницаемости ферромагнитных тел от степени их намагничения была установлена впервые русским ученым А. Г. Столетовым в 1872 г.

Общий характер зависимости проницаемости от индукции для разных сортов стали один и тот же, но максимальное значение μ может быть различным. Так, например, для обычной мягкой стали наибольшее значение μ, так называемая максимальная проницаемость — $\mu_{макс}$, достигает 3 500; в более твердых сортах стали проницаемость меньше, а у чугуна она падает до 200—300. Величина μ уменьшается с увеличением твердости стали.

Проницаемость ферромагнитных тел зависит не только от характера самого материала и степени его намагничения,



Фиг. 29.

но и от ряда других факторов, в частности от толщины материала и от частоты проходящего через него переменного магнитного потока, если этот материал используется в качестве сердечника катушки, питаемой переменным током.

При повышении частоты проницаемость всех ферромагнитных материалов в большей или меньшей степени уменьшается. Что касается толщины материала, то более тонкие листы с повышением частоты дают меньшее падение проницаемости. Более подробно этот вопрос разобран в гл. 4.

Сила, с которой магнитное поле действует на магнитную стрелку, как мы говорили выше, называется напряженностью магнитного поля H. При отсутствии стального сердечника (в воздухе) величина магнитной индукции B численно равна напряженности магнитного поля H, так как при этом μ равно 1:

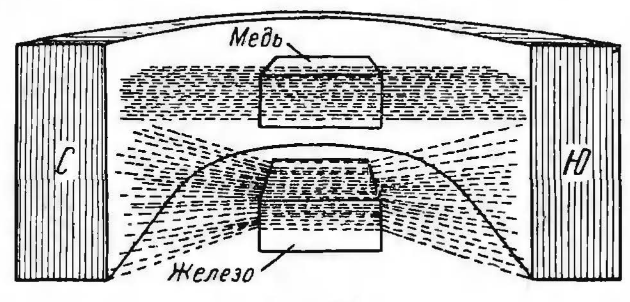
$$B = H.$$

При введении в магнитное поле стали с магнитной проницаемостью, равной μ, количество силовых линий в стали

и индукция, а следовательно, и напряженность магнитного поля, увеличатся в μ раз. Таким образом, после внесения в магнитное поле стали, индукция станет равной:

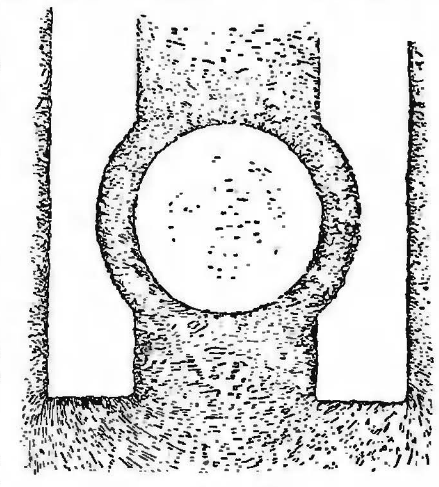
$$B = \mu H.$$

При внесении в постороннее магнитное поле стали она намагничивается и создает свое собственное магнитное по-



Фиг. 30.

ле. Магнитное поле стали, складываясь с основным полем магнита или соленоида, дает некоторое результирующее поле. В нем силовые линии имеют уже иное направление, чем это было до внесения стали, которая представляет для них значительно меньшее сопротивление, чем воздух, и сгущаются в ней. Внесение диамагнитного тела не окажет на магнитное поле почти никакого влияния, и силовые линии свободно пройдут сквозь такое тело, как будто оно совсем отсутствует (фиг. 30).



Фиг. 31.

Если в магнитное поле внести стальной полый шар или полый цилиндр, то значительное количество проходящих в этом месте силовых линий отклонится от своего прежнего направления и пройдет по стали; внутри же шара или цилиндра магнит-

ное поле окажется весьма ослабленным (фиг. 31). Этим явлением пользуются для создания так называемой магнитной защиты — экранирования. Приборы и аппаратуру для защиты от внешних магнитных воздействий помещают в экран, изготовленный из мягкой стали с большой проницаемостью. При этом силовые линии внешнего магнитного поля пройдут по стали экрана, не проникая внутрь его.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ

Способность стали под влиянием магнитного поля тока создавать собственное магнитное поле широко используется современной техникой для самых разнообразных нужд, в частности, в тех случаях, когда надо получить магнитное поле такой напряженности, которой не в состоянии дать постоянный магнит, или когда поле должно быть переменным по величине или направлению.

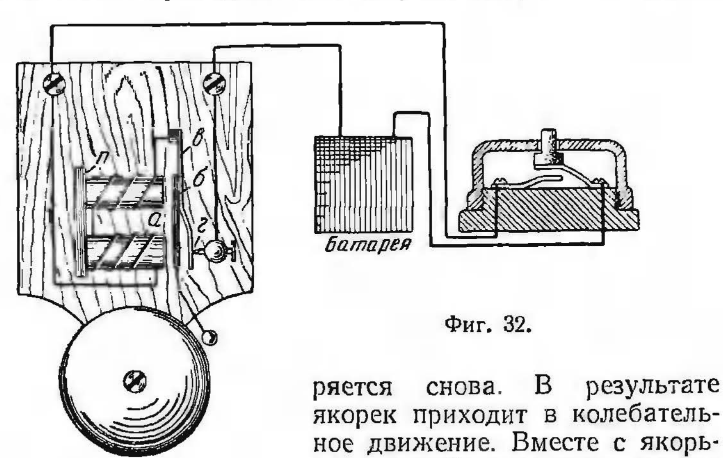
Практически большое применение имеют так называемые электромагниты, т. е. катушки (соленоиды), намотанные из изолированной проволоки со вставленным в них стальным сердечником. Электромагниты достаточной мощности, подвешенные к подъемным кранам, применяются для подъема и переноски чугуна, стали и изделий из них (чушки, балки и т. д.). Электромагнит опускается краном к стальным изделиям; при включении тока они притягиваются к электромагниту и вместе с ним переносятся краном в нужное место. Здесь ток выключается, и стальной груз падает вниз.

Подобным же образом работают магнитные патроны, применяемые в металлообрабатывающих станках. В такой патрон вместо зажимных кулачков помещают электромагнит, подключенный к источнику постоянного тока; электромагнит удерживает обрабатываемое изделие в нужном положении. После окончания обработки ток выключают и изделие снимается с патрона.

Электромагниты малой мощности используются в электрических звонках, телеграфных аппаратах, электрических часах, громкоговорителях и в целом ряде других приборов и аппаратов электро- и радиотехники.

Электрический звонок. На фиг. 32 показано устройство электрического звонка. При нажимании кнопки ток из батареи через винт *г* и пружину *в* проходит в катушки электромагнита и намагничивает его сердечник *а*. Стальной якорек *б* притягивается к электромагниту и отходит вместе с пружи-

ной *в* от винта *г*. Так как электрическая цепь при разъединении пружинки и винта разрывается, то прохождение тока через обмотки электромагнита прекращается, сердечники перестают притягивать якорек, и последний вследствие упругости пружины отходит на прежнее место. При этом контакт между пружиной и винтом восстанавливается, ток вновь начинает проходить в электромагнит, и все повто-

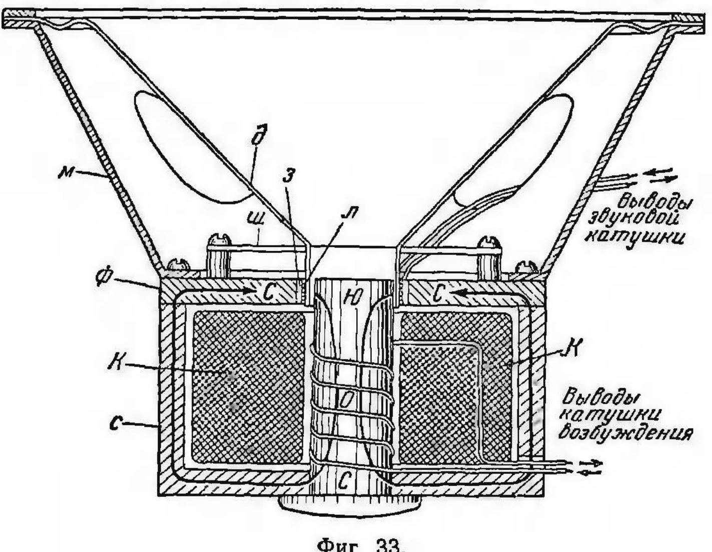


Фиг. 32.

ряется снова. В результате якорек приходит в колебательное движение. Вместе с якорьком колеблется также жестко соединенный с ним металлический шарик, который, ударяясь о чашечку звонка, заставляет ее звенеть.

Электродинамический громкоговоритель. Электромагнит, применяемый в электродинамических громкоговорителях для создания сильного магнитного поля в кольцевом зазоре, имеет иную, более сложную форму (фиг. 33). Массивный стержень (сердечник или керн) *о* закреплен в центре круглого стакана *с*, закрытого крышкой *ф* с круглым отверстием. Все эти части электромагнита изготовляются из мягкой стали с большой проницаемостью, представляющей малое сопротивление магнитному потоку. На стержень внутри стакана надевается катушка *К* — так называемая катушка возбуждения или подмагничивания. Она состоит из большого числа витков изолированной медной проволоки, которая заполняет все свободное пространство внутри стакана. Если через эту катушку, схематически изображенную на чертеже несколькими витками толстой проволоки, пропустить ток, то сердечник *о* намагнитится, причем на верхнем конце его, при указанном на фигуре направлении то-

ка, окажется южный полюс *Ю*, а на нижнем—северный *С*. Так как сталь представляет для силовых линий магнитного потока меньшее сопротивление, чем воздух, то главная часть магнитного потока, созданного в сердечнике проходящим по обмотке током, пройдет по стакану и крышке к воздушному зазору *з*. Благодаря этому в воздушном кольцевом зазоре будет создано сильное магнитное поле, необходимое для работы электродинамического громкоговорителя. Для работы



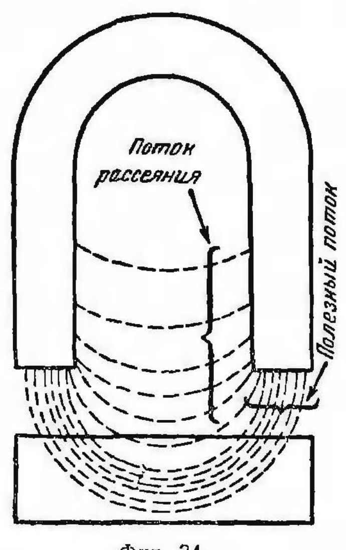
Фиг. 33.

электромагнита направление тока и полярность сердечника не играют роли, и он будет нормально работать при любом включении обмотки возбуждения.

Части электромагнита, по которым проходит магнитный поток, образуют собой магнитную цепь. Однако не весь магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом или электрическим током в электромагните, выходит из полюсов и проходит через магнитную цепь, Некоторая часть его проходит более короткими путями, создавая так называемый поток рассеяния (фиг. 34).

Поток рассеяния может достигать значительной величины. Так, например, в магнитной цепи электродинамического громкоговорителя, изображенного на фиг. 33, поток рассеяния достигает 40—50% всего магнитного потока. Поток рас-

сеяния не используется по назначению и представляет собой в этом смысле потери. Поэтому при конструировании магнитных цепей стремятся, насколько возможно, уменьшить поток рассеяния, изменяя соответствующим образом очертание магнитой цепи и уменьшая ее сопротивление магнитному потоку путем увеличения сечения отдельных частей и подбора материала с максимальной проницаемостью.



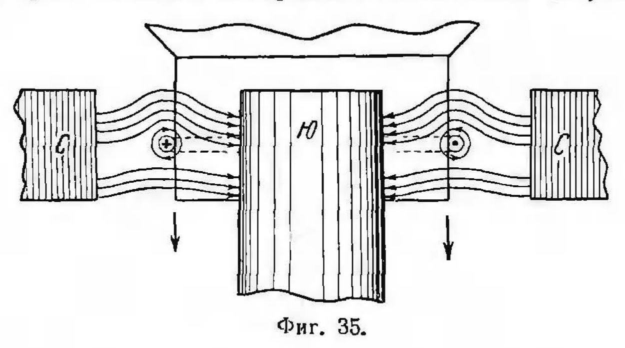
Фиг. 34.

Работа самого громкоговорителя также основана на известных уже нам законах взаимодействия магнитных полей. В воздушном зазоре электромагнита при помощи центрирующей шайбы *ш* подвешивается легкая подвижная катушка из тонкой изолированной проволоки *л*, так называемая звуковая катушка, жестко соединенная с диффузором *д*, который в свою очередь укреплен на металлическом конусе *м*. При пропускании переменного тока звуковой частоты от приемника или усилителя через подвижную катушку, последняя создает свое магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем в зазоре, заставляет подвижную катушку перемещаться вверх или вниз в зависимости от направления протекающего по ней тока. Чтобы более ясно понять процесс, который при этом происходит, представим себе, что подвижная катушка, помещенная в зазор электромагнита, состоит из одного витка.

На фиг. 35 показано направление силовых линий тока звуковой катушки. В данный момент эти линии создаются током, который идет в левой части витка от наблюдателя за плоскость чертежа и выходит из правой его части к наблюдателю. Там же показано и направление силовых линий электромагнита. Поверх витка направления линий поля звуковой катушки и поля электромагнита совпадут и линии будут отталкиваться друг от друга. Наоборот, ниже витка линии поля звуковой катушки и поля электромагнита на-

правлены в противоположные стороны и будут притягиваться друг к другу. Следовательно, при указанном направлении тока на виток будет действовать сила, направленная вниз. При перемене направления тока изменится также и направление силы, действующей на виток. Это явление будет происходит не только в одном витке, но и во всех остальных витках, т. е. во всей катушке.

При пропускании через подвижную катушку переменного тока звуковой частоты направление сил, действующих на катушку, будет меняться сообразно с изменением направления



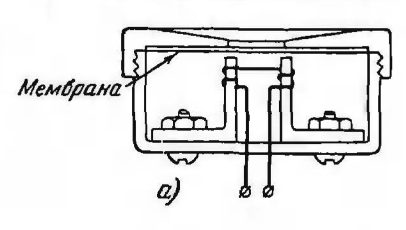
Фиг. 35.

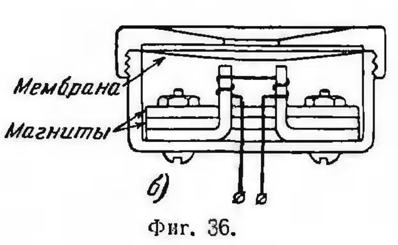
тока, и катушка придет в колебательное движение. Соединенный с ней диффузор также станет колебаться и будет создавать звук, высота которого будет определяться частотой поданного в катушку переменного тока.

Успехи, достигнутые промышленностью в разработке и выпуске постоянных магнитов из специальных сплавов, позволили заменить в динамических громкоговорителях сложные и громоздкие электромагниты постоянными магнитами. Это облегчило и упростило конструкцию самого громкоговорителя и сделало излишним выпрямители, необходимые для питания обмотки возбуждения. Постоянные магниты, изготовленные из специальных сплавов, обеспечивают индукцию в зазоре 6 000—8 000 *гс*, что достаточно для нормальной работы громкоговорителя.

Следует отметить, что величина напряженности магнитного поля в зазоре динамических громкоговорителей существенным образом влияет на качество воспроизведения звука: чем больше напряженность поля, тем выше качество воспроизведения. При увеличении напряженности поля повышается отдача громкоговорителя, расширяется диапазон

воспроизводимых частот, уменьшаются обусловленные резонансами отдельных элементов диффузора и всей подвижной системы пики и провалы частотной характеристики, уменьшаются время нестационарных процессов, что важно для воспроизведения музыки, особенно звука ударных инструментов и рояля. С увеличением напряженности поля повышается также разборчивость речи (артикуляция). Поэтому во всех случаях, где это представляется возможным по экономическим и производственным соображениям, напряженность поля в зазоре динамических громкоговорителей следует делать возможно большей.





Фиг. 36.

Телефонные трубки. В радиотехнике и телефонии применяется также и другой прибор, предназначенный для преобразования электрического тока низкой частоты в звуковые колебания — телефон. В его конструкцию помимо электромагнита введен еще постоянный магнит. Необходимость его вызвана следующим.

На фиг. 36,*а* схематически показано устройство, состоящее из электромагнита со стальным сердечником и катушкой, а также мембраны, края которой жестко закреплены на корпусе.

При подаче в обмотку электромагнита переменного тока в его стальном сердечнике возникнет переменный магнитный поток, который заставит мембрану прийти в колебательное движение.

За первый полупериод тока (фиг. 37,*а*) мембрана притянется электромагнитом и возвратится в прежнее положение, совершив одно полное колебание. За второй полупериод мембрана независимо от перемены направления тока

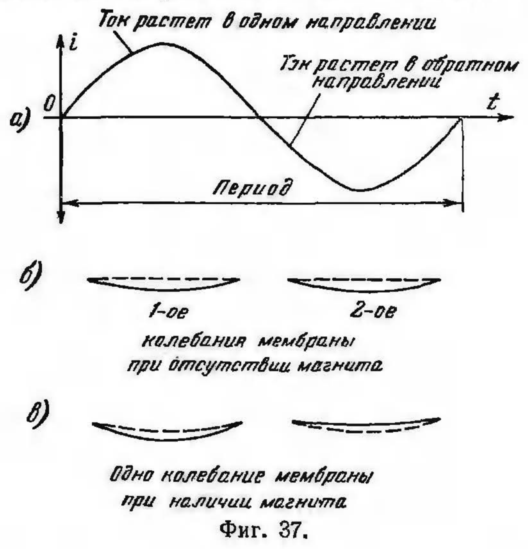
---

[1] Несмотря на быстроту возникновения электрических и магнитных явлений, они требуют для полного своего установления определенного, хотя и короткого, времени, называемого временем устанавливающихся или нестационарных процессов. Во многих случаях время устанавливающихся процессов играет большую роль.

притянется вторично и снова возвратится в нейтральное положение, совершив второе полное колебание. Таким образом, за один период тока мембрана совершит два полных колебания (фиг. 37,*б*), и частота ее колебаний окажется вдвое больше частоты поданного в обмотку тока.

Пользоваться таким телефоном, который удваивает частоту, нельзя. Наличие же в телефоне постоянного магнита позволяет избежать удвоения частоты.

Разрез нормальной телефонной трубки с постоянным магнитом показан на фиг. 36,*б*. Магнит телефона состоит из



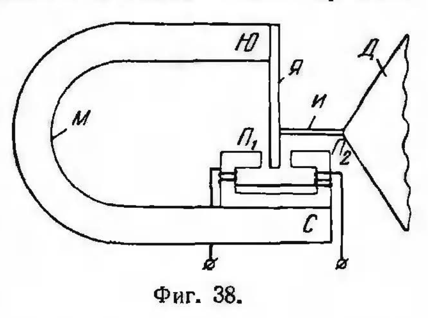
Фиг. 37.

одного или двух-трех подковообразных магнитов, которые стягиваются болтами в одну систему[1]. С помощью этих же болтов к полюсам магнитов крепятся полюсные наконечники с двумя электрически соединенными между собой катушками. На чертеже они показаны схематически в виде нескольких витков.

Так как мембрана обладает определенной гибкостью и расположена в непосредственной близости от полюсных на-

[1] Магнит часто изготовляется из нескольких тонких, а не из одного толстого куска стали по производственным соображениям, так как штамповка сравнительно тонкой ленты из твердой магнитной стали проще штамповки толстой. Иногда магниты для телефонов отливаются из специальных сплавов.

конечников, то под их притягивающим действием она несколько прогнется и останется в таком положении. Если пропустить через катушки ток, то мембрана будет по-разному реагировать на ток различного направления. При одном направлении тока магнитные полюса катушек совпадут с полюсами полюсных наконечников, магнитное поле усилится, и мембрана сильнее прогнется вниз. При перемене направления тока магнитные полюса катушек окажутся противоположными полюсам постоянного магнита и поэтому ослабят их. Воздействие ослабленного основного поля на мембрану окажется более слабым, и под влиянием собственной упругости она отойдет от полюсных наконечников на расстояние, большее, чем это имело место при отсутствии тока в катушках. Таким образом, за первый полупериод тока мембрана, прогибаясь вниз, совершит одну половину колебания, а за второй полупериод, поднимаясь вверх, — вторую. В результате за один период тока мембрана совершит тоже одно полное колебание (фиг. 37,*в*), Частота колебаний мембраны окажется равной частоте поданного на катушки переменного тока, и телефон будет работать нормально.



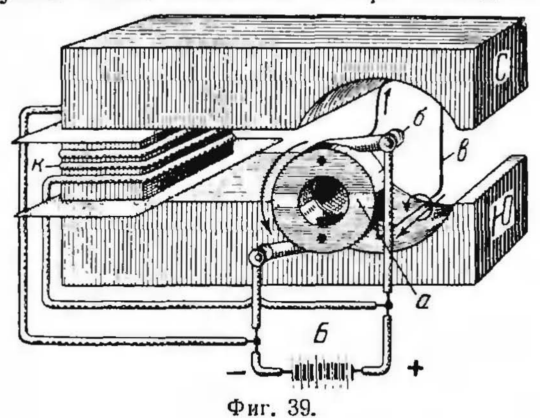
Фиг. 38.

Электромагнитный громкоговоритель. На фиг. 38 показано устройство электромагнитного громкоговорителя наиболее распространенного у нас типа «Рекорд». Здесь *М* — постоянный магнит с полюсами *С* и *Ю*; *Я* — якорь, представляющий собой жестко связанную с одним из полюсов магнита упругую полоску мягкой стали; $П_1$ и $П_2$ — полюсные наконечники с двумя электрически связанными между собой катушками; *И* — игла, передающая колебания якоря бумажному диффузору *Д*.

При отсутствии тока в катушке магнитный поток постоянного магнита от северного полюса *С* через полюсные наконечники $П_1$ и $П_2$ проходит в якорь и по нему в южный полюс магнита *Ю*. Часть магнитного потока пойдет непосредственно из северного полюса в южный, минуя якорь и образуя поток рассеяния. Так как якорь расположен на одинаковом расстоянии от обоих полюсных наконечников,

то силы притяжения его каждым из полюсов равны, и он будет находиться в покое. Но как только мы пропустим через катушки ток, положение изменится: поле, создаваемое током в одной из катушек, например в катушке, расположенной на полюсном наконечнике $П_1$, совпадая по направлению с полем постоянного магнита, усилит его, а поле, создаваемое током в другой катушке, имея направление, обратное направлению поля постоянного магнита, ослабит его. В силу этого якорь отклонится от своего среднего положения в сторону полюсного наконечника $П_1$.

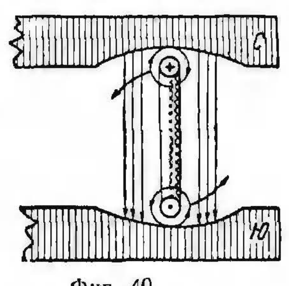
При перемене направления тока направление магнитных полей катушек также изменится. Теперь совпадающим с полем магнита окажется поле той катушки, которая находится на наконечнике $П_2$, результирующее поле у которого усилится; поле же другой катушки окажется направленным навстречу полю магнита, и результирующее поле у наконечника $П_1$ ослабится. Вследствие этого якорь отклонится в сторону наконечника $П_2$. При подаче на катушки переменного тока звуковой частоты якорь придет в колебательное движение с частотой, равной частоте поданного на катушки тока, и связанный с якорем при помощи иглы диффузор издаст звук соответствующего тона.



Фиг. 39.

Электродвигатель. На использовании явления выталкивания и втягивания проводника с током междуполюсным пространством магнита основано действие электрических двигателей. На фиг. 39 показано схематическое устройство такого двигателя. Между полюсами электромагнита *С* и *Ю* помещен виток медной проволоки *в*, концы которого соеди-

ны с медными изолированными друг от друга пластинками *а*. Такое устройство, называемое коллектором, служит для подводки тока к витку. К коллектору ток подается по двум неподвижным расположенным с противоположных его сторон щеткам *б* из проводящего материала (прессованная медная сетка, графит, уголь), которые при помощи пружин прижимаются к коллектору. Ток от источника *Б* (батарея, сеть) подается одновременно в обмотку электромагнита *к*, создающего магнитное поле между полюсами *С* и *Ю*, а через щетки и пластинки коллектора — в виток. При прохождении тока через виток вокруг последнего создается магнитное поле с силовыми линиями, направленными как указано на чертеже, т. е. в верхней половине — по часовой стрелке, в нижней — против нее.



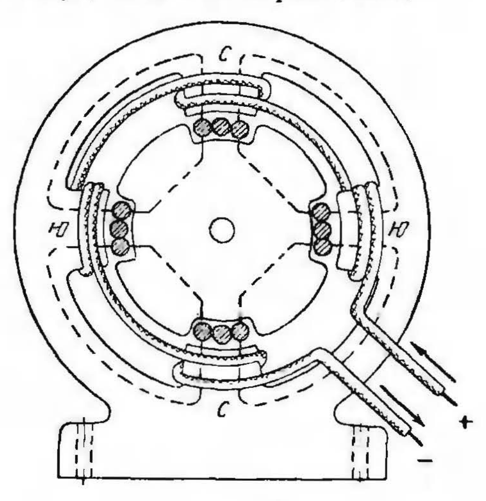
Фиг. 40.

Разрез витка, направление тока и силовых линий показаны на фиг. 40. Нетрудно определить, что на верхнюю часть витка будет действовать сила, направленная влево, а на нижнюю — направленная вправо, т. е. к витку будут приложены вращающие усилия, под влиянием которых виток, будучи укрепленным на оси, станет вращаться против часовой стрелки. В практических конструкциях для усиления действия электродвигателей вместо одного витка наматывают катушку из многих витков, при этом на ось помещают не одну, а несколько таких катушек, распределяя их по всей окружности. Все это укрепляют на стальном барабане, носящем название якоря. Кроме того, часто количество полюсов электромагнита увеличивают до 4—6 и больше (фиг. 41).

Стальной якорь вводится для усиления магнитного поля, создаваемого током, протекающим по катушкам якоря, а также для того, чтобы облегчить силовым линиям электромагнита прохождение от полюса к полюсу. Так как проницаемость стали во много раз больше проницаемости воздуха, то при введении стального якоря в междуполюсное пространство электромагнита магнитная индукция, создаваемая полюсами, значительно возрастет, и воздействие их на поле вращающихся катушек будет сильнее.

Нетрудно сообразить, что направление вращения якоря сохранится и в том случае, если у источника тока переме-

нить полюса, так как направления силовых линий полей электромагнита и катушек якоря изменятся одновременно и вращающие усилия сохранят свое направление таким же, как и до перемены полюсов. В силу этого коллекторные электродвигатели могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. В случае необходимости перемены направления вращения электродвигателя меняют направление тока не одновременно в обеих обмотках, а в одной из них. либо в якоре, либо в электромагните.

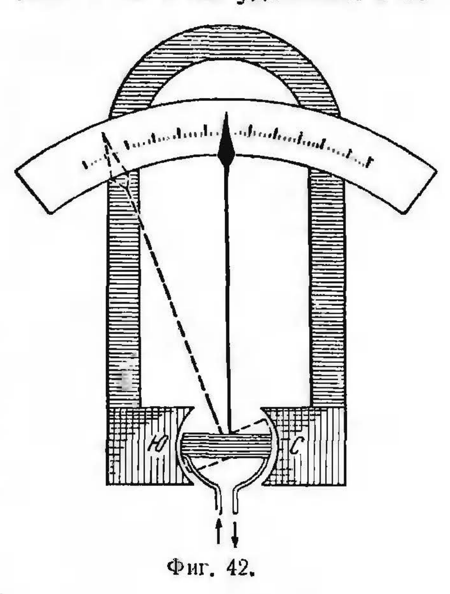


Фиг. 41.

Электроизмерительные приборы. На этом же явлении взаимодействия магнитных полей тока и магнита основано действие некоторых электрических измерительных приборов: гальванометров, вольтметров, амперметров и др. Устройство такого прибора показано на фиг. 42. Между полюсами *С* и *Ю* постоянного магнита помещена легкая катушка из тонкой изолированной проволоки. Катушка жестко соединена со стрелкой-указателем, вместе с которой она может вращаться вокруг оси, проходящей посредине между полюсными наконечниками. При пропускании через катушку тока создается магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем постоянного магнита, заставляет катушку, а вместе с ней и стрелку, отклоняться в ту или другую сторону в зависимости от направления тока (см. пунктирное положение). При отсутствии тока катушка со стрелкой возвращается в преж-

нее положение спиральными пружинками, расположенными обычно по обеим сторонам катушки (на фигуре не показаны) и используемыми одновременно для подводки тока к концам катушки. Приборы этого типа называются магнитоэлектрическими приборами.

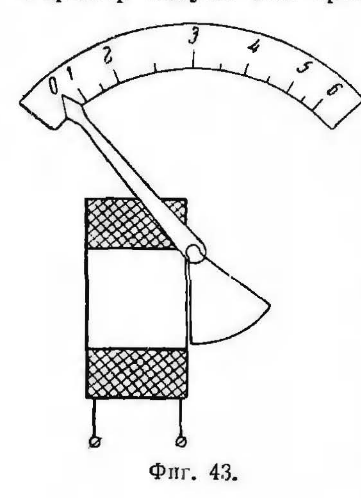
В магнитоэлектрических приборах угол отклонения стрелки пропорционален силе протекающего через катушку тока; поэтому шкала таких приборов равномерна, т. е. все деления ее одинаковы. Это делает их очень удобными в обращении. Если через катушку пропустить переменный ток, то направление сил, действующих на катушку, будет беспрерывно изменяться, и катушка со стрелкой будет испытывать беспрерывные толчки в одну и другую стороны. При значительном числе перемен в секунду, например при 50 *гц* (частота городской осветительной сети), катушка со стрелкой не успеет отклоняться вслед за этими переменами. Она будет лишь дрожать, и прибор не покажет величины проходящего по нему тока. Магнитоэлектрическими приборами можно измерять только постоянный или выпрямленный, хотя бы и пульсирующий, ток, так как в этом случае поле катушки будет действовать в одном и том же направлении.



Фиг. 42.

На использовании явления втягивания стали в соленоид основано действие электромагнитных измерительных приборов. На фиг. 43 схематически показано устройство такого прибора. В непосредственной близости от катушки прибора на свободно вращающейся оси подвешен якорь, изготовленный из мягкой стали, и жестко связанная с ним легкая указательная стрелка. При пропускании тока через катушку якорь втягивается и поворачивает-

ся на своей оси, увлекая за собой стрелку, которая указывает на шкале прибора значение силы проходящего через катушку тока или величину поданного на нее напряжения (в зависимости от назначения прибора и способа его включения). Для возвращения якоря и стрелки в начальное положение при выключении тока служит спиральная пружина. Для того чтобы она, намагнитившись, не влияла на показания прибора, ее изготовляют из диамагнитного металла, например латуни или бронзы. Так как при изменении направления тока в катушке направление силы втягивания не изменяется (при перемене полярности соленоида изменяется и полярность якоря), то *электромагнитные приборы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока*[1].



Фиг. 43.

Так как действующая на сталь сила втягивания по мере перемещения якоря изменяется, а именно при приближении якоря к катушке сначала возрастает, а затем при дальнейшем втягивании уменьшается, то угловые перемещения якоря и стрелки не будут пропорциональны силе протекающего через катушку тока, и шкала прибора поэтому будет неравномерной.

Пользоваться неравномерной шкалой с мелкими делениями на ее концах, особенно в начале, неудобно; кроме того, вследствие неравномерности делений точность отсчета на концах шкалы меньше точности отсчета на ее середине. Поэтому электромагнитные приборы в большинстве случаев применяются в качестве щитовых приборов невысокого класса точности.

---

[1] Шкала переменного тока будет несколько отличаться от шкалы постоянного тока за счет влияния гистерезиса—явления, описанного ниже в гл. 3.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

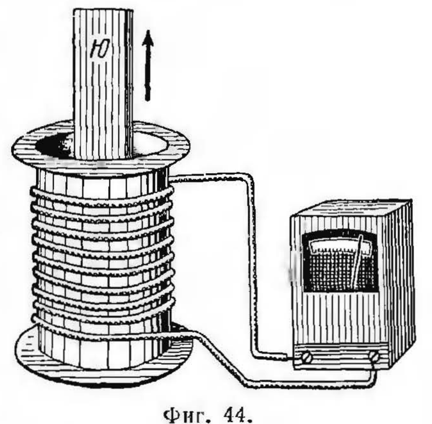
ПЕРЕМЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Выше уже упоминалось о наличии тесной связи между электрическими и магнитными явлениями; в частности, мы подробно рассмотрели связь между электрическим током и создаваемым им магнитным полем; но эта связь идет гораздо глубже.

Проделаем несколько опытов, которые покажут, что при определенных условиях магнитное поле в свою очередь способно создавать электрический ток.

Вставим постоянный магнит в катушку, намотанную из изолированной медной проволоки, и присоединим ее концы к электрическому измерительному прибору — гальванометру. Так как катушка не соединена с каким-либо источником электрического тока, то при ее включении прибор не даст отклонения. Если быстрым движением выдернуть из катушки магнит, то стрелка гальванометра отклонится и тотчас же вернется на прежнее место (фиг. 44). Это показывает, что во время движения магнита в катушке возник электрический ток. Если таким же быстрым движением снова вставить магнит в катушку, то стрелка гальванометра снова отклонится, но в другую сторону и тоже только на время движения магнита.



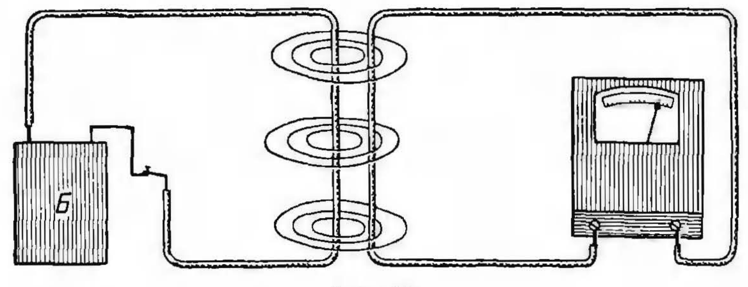
Фиг. 44.

Как же объяснить это явление? Вокруг магнита, как мы знаем, существует магнитное поле. При движении магнита вместе с ним перемещается и его поле; следовательно, магнитное поле возле катушки меняется, и эти изменения магнитного поля создают электрический ток в катушке. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, связано с тем, что силовые линии поля при удалении и приближении магнита пересекают витки катушки. Следовательно,

всякий раз, когда силовые линии пересекают витки катушки и притом так, что общий магнитный поток через нее меняется, в ней возникает электрический ток.

Это явление носит название **электромагнитной индукции**. Возникший же вследствие изменения окружающего магнитного поля электрический ток называется индуктированным.

Если рядом с проводником, по которому течет ток, поместить второй проводник, то при включении и выключении тока в первом проводнике силовые линии его поля будут пересекать второй проводник, в котором в силу этого появит-



Фиг. 45.

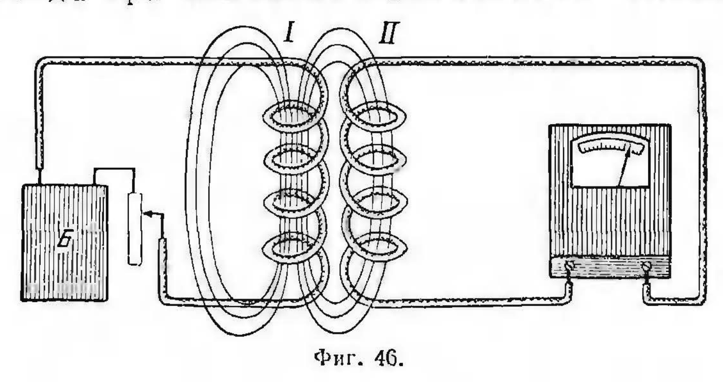
ся индуктированный ток (фиг. 45). Явление будет происходить так же, как при вдвигании или выдвигании магнита из катушки.

Явление индукции при включении и выключении тока будет выражено более резко, если вместо проводников взять две расположенные рядом катушки с большим количеством витков, так как вторую катушку будет пронизывать большой магнитный поток первой катушки. Индуктирование тока во второй катушке будет происходить также и в том случае, если изменение магнитного поля первой катушки будет производиться не включением и выключением тока, а путем изменения величины проходящего по ней тока.

Соберем схему, показанную на фиг. 46, и, установив ручку реостата в среднем положении, включим в катушку *I* электрический ток. В катушке *II* индуктированный ток появится только при включении, так как только в этот момент будет происходить изменение магнитного поля, вызванное движением силовых линий возникающего поля. Когда поле установится и движение силовых линий прекратится, индуктированный ток исчезнет, несмотря на то, что в катушке *I*

ток продолжает итти. Индуктированный ток появится снова, как только мы нарушим равновесие магнитного поля, двигая ручку реостата в одну или другую сторону и изменяя величину электрического тока, протекающего по катушке *I*. Такой же эффект индуктирования электрического тока получится и в том случае, когда, установив в катушке *I* ток произвольной, но постоянной величины, мы станем перемещать одну катушку относительно другой.

На основании этого можно сказать, что и н д у к т и р о в а н н ы й э л е к т р и ч е с к и й т о к б у д е т в о з н и к а т ь в с е г д а п р и и з м е н е н и и м а г н и т н о г о п о т о к а,



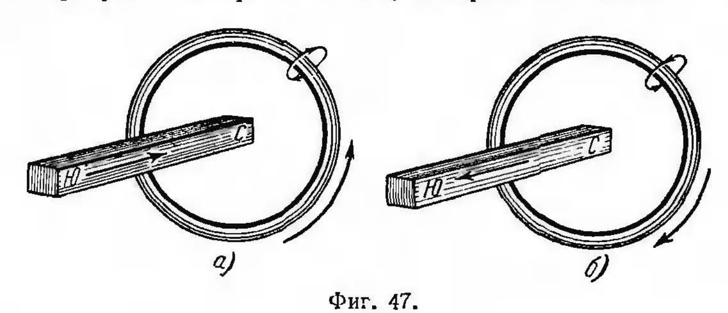
Фиг. 46.

п е р е с е к а ю щ е г о п р о в о д н и к, к а к о й б ы п р и ч и н о й э т о и з м е н е н и е н и в ы з ы в а л о с ь. Важно только, чтобы при этом происходило пересечение проводника силовыми линиями поля. Если же проводник расположен относительно магнитного поля так, что при изменении поля силовые линии будут скользить вдоль проводника, электрический ток индуктироваться не будет. Если магнитное поле относительно проводника неподвижно, то электрический ток в проводнике индуктироваться также не будет.

В опытах с индуктированием электрического тока при помощи постоянного магнита мы уже обратили внимание на то, что индуктированный в катушке ток при вдвигании магнита имел иное направление, чем при выдвигании. Такое же наблюдение мы можем сделать и в опытах с проводниками и катушками: при включении тока в один из проводников ток во втором имел такое направление, что магнитное поле этого второго тока было направлено навстречу магнитному полю первого тока. Наоборот, при выключе-

нии индуктированный ток менял свое направление, и направление магнитного поля индуктированного тока совпадало с направлением магнитного поля индуктирующего тока. Вообще направление индуктированного тока во всех случаях определяется законом Ленца[1]: индуктированный ток имеет такое направление, при котором он противодействует вызвавшей его причине.

Если к витку проволоки приблизить магнит так, так это указано на фиг. 47,*а*, то в витке возникнет ток, магнитное поле которого будет противодействовать приближению магнита: на стороне витка, обращенной к магниту, как бы образуется северный полюс, который оттолкнет от себя



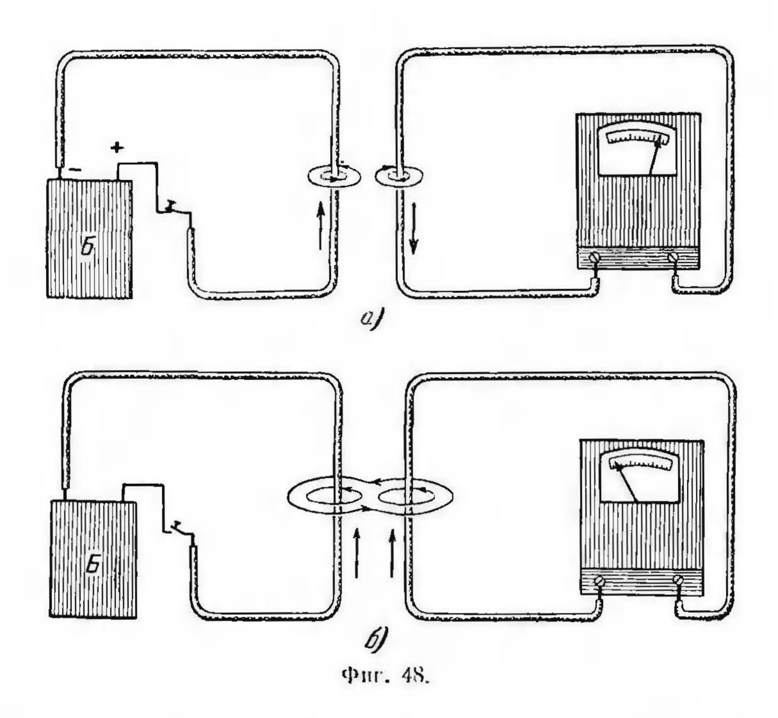
Фиг. 47.

северный полюс магнита и будет противодействовать его приближению. Наоборот, при удалении магнита ток в витке переменит свое направление, и его силовые линии расположаться так, что на стороне витка, обращенной к магниту, как бы образуется уже южный полюс, который притянет северный полюс магнита и будет противодействовать его удалению (фиг. 47,б).

Точно так же все будет происходить и в случае с двумя проводниками. При включении тока в первый проводник (фиг. 48,*а*) во втором возникнет индуктированный ток противоположного направления, поле которого будет направлено навстречу полю первого проводника и будет противодействовать его нарастанию. При выключении тока во втором проводнике возникнет ток направления,

---

[2] Академик Э. Х. Ленц (1804—1865) — известный русский ученый, открывший важнейшие законы электричества, многие из которых носят его имя.



Фиг. 48.

одинакового с первым (фиг. 48,*б*). Поле индуктированного тока также совпадет по направлению с полем тока первого проводника и будет стремиться поддержать его — противодействовать его исчезновению.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

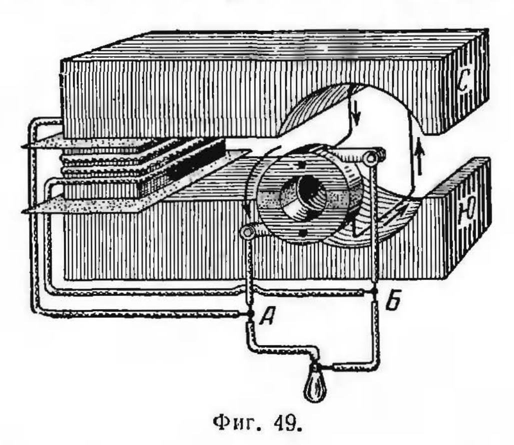
Генераторы электрического тока. На использовании явления электромагнитной индукции основано действие электрических машин — генераторов электрического тока.

Рассмотрим действие генератора постоянного тока. Устройство его весьма сходно с устройством электродвигателя, действие которого было рассмотрено выше.

На фиг. 49 (так же, как и на фиг. 39) показан электромагнит, между полюсами которого *С* и *Ю* помещен якорь с обмоткой, схематически изображенной на фигуре одним витком. Для изготовления электромагнита генератора употребляются специальные сорта стали, обладающие одновре-

менно большой проницаемостью и достаточной коэрцитивной силой.

Перед пуском генератора в первый раз по его изготовлении через обмотку электромагнита пропускают постоянный ток от постороннего источника, который намагничивает сердечник и полюса электромагнита. После выключения тока благодаря значительной коэрцитивной силе материала в сердечнике электромагнита сохраняется некоторый остаточный магнетизм, необходимый для начала работы генератора. Если теперь присоединить обмотку электромагнита к щеткам, как указано на фиг. 49, и дать якорю вращатель-



Фиг. 49.

ное движение, то витки будут пересекаться силовыми линиями поля, создаваемого остаточным магнетизмом электромагнита, и в них возникнет электрический ток. Но в точках *А* и *Б* ток разветвится: часть его пойдет во внешнюю цепь, которая на фигуре представлена электрической лампочкой, а часть — в обмотку электромагнита, где усилит первоначальное магнитное поле.

Обмотка, служащая для образования магнитного поля электромагнита, носит название о б м о т к и в о з б у ж д е н и я.

Устройство генератора постоянного тока ничем не отличается от устройства электродвигателя, но коллектор в генераторе служит не для распределения тока по якорным обмоткам, а для выпрямления его. Поэтому всякий генератор постоянного тока при присоединении его к постоянному источнику тока можно использовать так электродвигатель.

Принципиально так же устроены и другие машины, предназначенные для получения электрического тока за счет механической энергии вращения: генераторы переменного тока, индукторы, применяемые в телефонии, магнето для зажигания смеси в двигателях внутреннего сгорания и др.

Генераторы переменного тока в основном отличаются от генераторов постоянного тока тем, что обмотки их электромагнитов, которые должны сохранять постоянную полярность, питаются не от якоря, дающего переменный ток, а от постороннего источника постоянного тока, и тем, что для отвода тока во внешнюю цепь применяются не коллекторы, а особые кольца, по которым скользят токособирающие щетки. Таким посторонним источником тока является так называемый возбудитель — небольшой генератор постоянного тока, якорь которого часто монтируется на одной оси с генератором переменного тока, составляя с ним одно конструктивное целое.

Индукторы и магнето обладают незначительной мощностью; поэтому для создания магнитного поля в них оказывается достаточным применять постоянные магниты.

Трансформаторы и автотрансформаторы. Выше мы уже указали, что индуктированный электрический ток возникает в замкнутом проводнике в том случае, если изменяется пронизывающий его магнитный поток. Всякое возникновение электрического тока в цепи объясняется появлением в ней электродвижущих сил (э. д. с.). Поэтому более точно явление индукции следует сформулировать таким образом: *всякое изменение магнитного потока, пронизывающего проводник, вызывает появление э. д. с. индукции в этом проводнике.* Если проводник замкнут на внешнюю цепь, то возникшая э. д. с. создает ток в проводнике; если же проводник разомкнут, то ток в нем возникнуть не может, однако э. д. с. возникает в нем попрежнему[1]. Эта э. д. с. индукции может возбуждаться различными способами: перемещением постоянного магнита, приближением и удалением катушки с током, замыканием и размыканием тока в ней, изменением величины проходящего через катушку тока и т. д.

---

[1] После ознакомления с явлением электромагнитной индукции мы можем определить единицу магнитного потока — максвелл. Максвелл — это поток, который при равномерном его изменении в течение 1 сек. индуктирует в охватывающем его витке э. д. с., равную 10^{-8} *в*.

Такой же эффект получится, если вместо изменения величины проходящего по первой катушке (фиг. 46) тока пропустить через нее переменный ток. Тогда создаваемое им переменное магнитное поле будет беспрерывно пересекать витки второй катушки и индуктировать в ней переменную э. д. с. В идеальном случае при отсутствии всех потерь, когда все силовые линии поля, создаваемого первой катушкой, пересекают витки второй, э. д. с., индуктируемая в каждом витке второй катушки, будет равна напряжению, действующему в каждом витке первой. Допустим, что первая катушка, состоящая из 100 витков проволоки и обладающая очень малым активным сопротивлением, включена на источник переменного тока напряжением 50 *в*. Так как витки соединены последовательно и намотаны из той же проволоки, то напряжение, приходящееся на один виток, будет равно $50/100 = 0{,}5$ *в*. Если вторая катушка имеет тоже 100 витков, то при отсутствии потерь в ней возникнет индуктированная э. д. с. также в 50 *в*, т. е. 0,5 *в* на один виток. Если во второй катушке витков будет больше или меньше, чем в первой, то и величина индуктированной э. д. с. будет в такое же число раз больше или меньше. При 200 витках во второй катушке величина индуктированной в ней э. д. с. окажется равной $200 \cdot 0{,}5 = 100$ *в*, при 10 витках — $10 \cdot 0{,}5 = 5$ *в* и т. д.

Если активное сопротивление второй катушки мало, то напряжение на концах этой катушки примерно равно э. д. с., индуктированной в этой катушке. При разомкнутой катушке это равенство будет соблюдаться не приблизительно, а точно. Таким образом, все то, что сказано относительно э. д. с. во второй катушке, можно отнести и к напряжению на ее концах.

Следовательно, зависимость между количествами витков и напряжениями катушек *I* и *II* выразится следующим образом:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

где U_1 — напряжение переменного тока на зажимах катушки *I*;

U_2 — напряжение, индуктированное на зажимах катушки *II*;

w_1 — число витков катушки *I*;

w_2 — число витков катушки *II*.

Отношение w_1/w_2 называется коэффициентом трансформации. Оно показывает, во сколько раз количество витков катушки *II* больше количества витков катушки *I* или во сколько раз индуктированное напряжение больше напряжения, приложенного к катушке *I*.

Таким образом, рассмотренное нами явление электромагнитной индукции может быть применено для повышения или понижения имеющегося в нашем распоряжении переменного напряжения.

Устройство, состоящее из двух катушек (обмоток), назначением которого является повышение или понижение напряжения переменного тока, называется трансформатором[1]. Катушка, питающаяся переменным током извне, называется первичной обмоткой трансформатора, а вторая катушка, в которой индуктируется повышенная или пониженная э. д. с., — вторичной. В случае необходимости одновременно получить более высокое и более низкое по сравнению с сетевым напряжение, например, для питания ламп приемника или усилителя, трансформаторы изготовляются не с одной, а с двумя или больше вторичными обмотками, каждая из которых рассчитывается на нужное напряжение.

Чтобы усилить переменное магнитное поле, обе катушки помещают на стальной сердечник, который во много раз увеличивает индукцию, созданную током первичной обмотки, а, следовательно, вместе с тем и воздействие на вторичную обмотку. Для уменьшения потерь, возникающих в стали в переменном магнитном поле (о которых будет сказано ниже), сердечник трансформатора собирается из тонких (0,35—0,5 *мм*) листов специальной трансформаторной стали. Для уменьшения сопротивления магнитной цепи и уменьшения потока рассеяния, и чтобы заставить, по возможности, все создаваемые током первичной обмотки силовые линии пронизывать вторичную обмотку, концы стального сердечника соединяют между собой так, что они образуют замкнутую магнитную цепь. С этой же целью катушки сближают, насколько возможно, располагая их часто одну внутри другой.

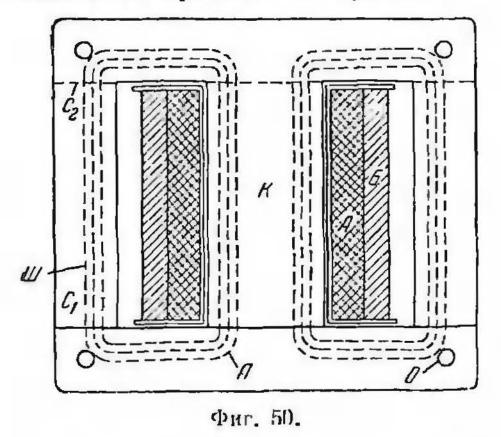
На фиг. 50 показан разрез трансформатора типа, часто применяемого для трансформирования переменных токов низкой частоты (до 10 000—15 000 *гц*.). Здесь *A* — первич-

---

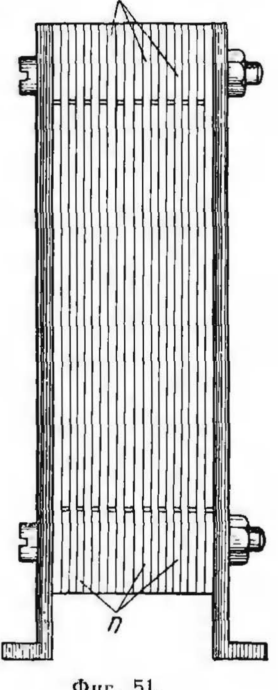
[1] Изобретателями трансформатора являются известный русский ученый П. Н. Яблочков (1847—1894) и конструктор И. Ф. Усагин.

ная обмотка; *Б* — вторичная; *К* — сердечник, собранный из вырезанных в форме буквы Ш пластинок трансформаторной стали (*Ш*). Замыкание магнитной цепи производится полосками *П* из того же материала. Чтобы уменьшить вредное действие воздушного зазора, увеличивающего сопротивление магнитной цепи, место их соединения переносят поочередно то на одну, то на другую сторону катушки, вставляя при сборке пластинки Ш то с одной, то с другой стороны (фиг. 51).

По выходе из катушки сердечник разветвляется на две части, которые огибают катушку с обеих сторон, образуя две параллельные ветви магнитной цепи. Создаваемый первичной обмоткой магнитный поток полностью проходит по средней ча-



Фиг. 50.



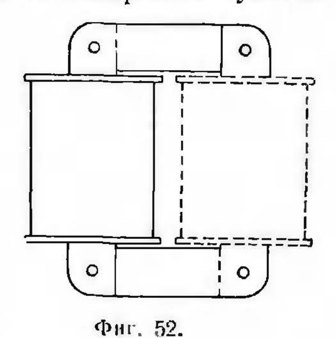
Фиг. 51.

сти сердечника и затем делится пополам, направляясь по его боковым ветвям, как показано на фиг. 50 пунктиром. Поэтому, для того чтобы все части сердечника работали при одной и той же магнитной индукции, среднюю часть сердечника делают вдвое большего сечения, чем боковые, т. е. вдвое шире, так как толщина сердечника посередине и по бокам одинакова. Во избежание утечки магнитных линий из острых углов сердечника последние иногда закругляются.

При работе трансформатора пластины сердечника, будучи намагниченными, взаимно отталкиваются и притягива-

ются и совершают колебания с частотой, равной частоте перемагничивания (с удвоенной частотой питающего переменного тока). При этом они будут создавать соответствующей высоты звук — трансформатор гудит, «поет». Так как на колебания пластин сердечника расходуется энергия, то с целью уменьшения потерь, уничтожения шума, а также для придания трансформатору соответствующего вида и удобства крепления сердечник стягивается болтами, продетыми сквозь отверстия O (фиг. 50).

Во избежание потерь на вихревые токи (см. ниже) отдельные пластины сердечника изолируются друг от друга путем покрытия лаком или оклейки их папиросной бумагой. Чтобы металлические стягивающие болты не могли соединить пластины сердечника в одну электрическую цепь, в отверстия сердечника вставляются трубки из изолирующего материала — бумаги, прессшпана и т. п.



Фиг. 52.

Кроме рассмотренной Ш-образной формы сердечника применяются также и другие, например, Г-образная форма, показанная на фиг. 52. В таких трансформаторах обмотки могут быть помещены на одной катушке (одна на другой) либо на двух, причем во втором случае первичная и вторичные обмотки могут быть намотаны либо порознь на отдельных катушках, либо пополам на обеих. При соединении таких половин между собой следят, чтобы ток, протекая последовательно через обе катушки, создавал магнитные поля одного направления. При неправильном соединении обеих половин обмотки магнитные поля будут уничтожаться, и трансформатор работать не будет.

В электрических сетях, особенно в больших городах, постоянно производятся включения и выключения различных аппаратов, приборов и машин — осветительных ламп, электрических звонков, электродвигателей, утюгов, плит и т. д., причем образующиеся в момент включения, и особенно при выключении, искры являются источниками высокочастотного излучения. Кроме того, сама работа некоторых аппаратов и приборов, как то: медицинских, электросварочных и др., — связана с непрерывным искрообразованием и созда-

нием мощных электромагнитных полей. Эти поля индуктируют в окружающих проводах токи, которые распространяются по электрической сети на довольно большие расстояния и через трансформаторы, главным образом через емкость между первичной и вторичными обмотками, проникают в приемники, создавая в громкоговорителе шум и трески.

Для того чтобы предотвратить попадание в приемники высокочастотных помех, между первичной и вторичными обмотками трансформатора (которые могут рассматриваться как обкладки конденсатора) часто прокладывается металлический экран, который, не нарушая нормальную работу трансформатора[1], преграждает путь помехам.

Для того чтобы экран не образовывал короткозамкнутого витка, его делают разрезным и оклеивают изолирующим материалом или покрывают лаком.

Экран имеет отдельный вывод, который присоединяется к корпусу приемника. Часто в качестве экрана используют специальную однослойную обмотку из изолированной проволоки, один конец которой остается свободным, а второй заземляется.

С точки зрения энергетической трансформаторы являются достаточно совершенными устройствами: к. п. д. мощных трансформаторов достигает 98%. Даже маломощные трансформаторы, применяемые в радиоприемниках и усилителях, имеют к. п. д. до 90%.

Для повышения или понижения напряжения переменного тока иногда применяют автотрансформаторы, которые представляют собой трансформаторы с одной обмоткой, но с несколькими выводами от нее (фиг. 53).

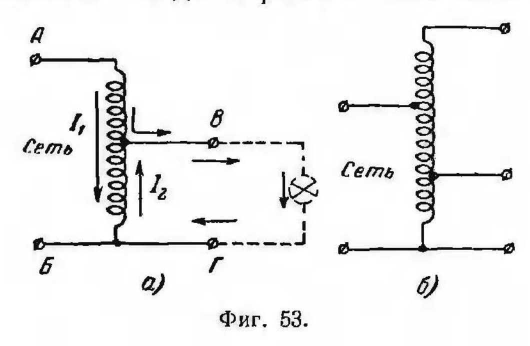
Так как вся обмотка автотрансформатора находится под полным напряжением питающей сети (зажимы *А* и *Б*), то каждый виток этой обмотки будет находиться под напряжением, во столько раз меньшим, сколько витков имеется в обмотке. Если мы подключим нагрузку к части обмотки у зажимов *В* и *Г*, то напряжение здесь будет равным сумме напряжений витков, находящихся между этими зажимами; оно окажется во столько раз меньшим напряжения, приложенного ко всей обмотке, во сколько раз число витков между этими зажимами меньше числа витков всей обмотки. Так,

---

[1] Экран изготовляется из диамагнитного материала — меди, латуни, алюминия, так что он не является препятствием для магнитного поля.

например, если вся обмотка автотрансформатора имеет 500 витков, а ответвление между зажимами B и Γ 250 витков, то при включении автотрансформатора в сеть переменного тока с напряжением 100 *в* на каждый виток будет приходиться: $^{100}/_{500} = 0{,}2$ *в*, а на 250 витков — $250 \cdot 0{,}2 = 50$ *в* (без учета потерь).

Если мы подключим сеть не ко всей обмотке, а только к части ее (фиг. 53,*б*), то на концах всей обмотки получим напряжение, повышенное по сравнению с сетевым. При наличии нескольких отводов с разными количествами витков



Фиг. 53.

от автотрансформатора можно получить несколько различных напряжений.

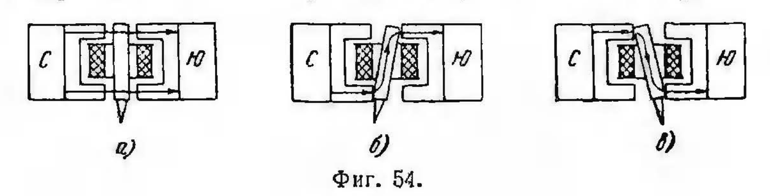
Направления сетевого тока I_1 и тока нагрузки I_2 на участке между зажимами B и Γ будут противоположны; в силу этого на участке $B - \Gamma$ будет протекать уменьшенный разностный ток $I_2 - I_1$, который создаст меньшее магнитное поле. Поэтому сечение сердечника у автотрансформатора берется меньшим, чем у трансформатора равной мощности. Расход меди у автотрасформаторов за счет отсутствия вторичных обмоток также значительно меньше, чем у трансформаторов. Поэтому автотрансформаторы сравнительно с трансформаторами равной мощности имеют меньшие габариты и вес.

Однако наряду с достоинствами автотрансформаторы имеют также существенные недостатки. В случае обрыва обмотки на участке между отводами к зажимам B и Γ на этих зажимах окажется почти полное напряжение сети, что может привести к выходу из строя включенной нагрузки, например радиоприемника, рассчитанного на 110 *в* и включенного через автотрансформатор в сеть 220 *в*. Кроме того,

вследствие малой индуктивности и индуктивного сопротивления обмотки (см. ниже) автотрансформаторы боятся коротких замыканий, при которых через обмотку проходят токи опасной величины.

Для трансформирования токов высокой частоты обычные трансформаторы с сердечниками из листовой стали не применяются из-за больших потерь, возникающих в сердечниках при этих частотах. Поэтому высокочастотные трансформаторы изготовляют либо совсем без сердечников, либо с сердечниками, отпрессованными из специальных порошкообразных высокочастотных материалов (см. гл. 4).

Звукосниматели и рекордеры. Явление индуктирования электрического тока в проводнике при изменении окружаю-



Фиг. 54.

щего проводник магнитного поля используется в электромагнитных звукоснимателях — приборах, предназначенных для электрического воспроизведения записи на граммофонных пластинках.

Звукосниматель (фиг. 54) состоит из подковообразного магнита, с полюсами которого *С* и *Ю* связаны П-образные наконечники, изготовленные из мягкой стали или других материалов, имеющих небольшие потери на гистерезис и достаточную магнитную проницаемость.

Посередине между полюсными наконечниками помещается якорь. Он изготовляется из тех же материалов, что и полюсные наконечники, и помещается внутри катушки в упругой резиновой трубке. Якорь при скольжении жестко связанной с ним иглы по бороздкам граммофонной записи будет совершать колебания в плоскости рисунка и поочередно занимать указанные на рисунке положения.

По мере того, как якорь будет отклоняться к положению, изображенному на фиг. 54,*б*, нижний конец его станет приближаться к полюсному наконечнику, укрепленному на северном полюсе магнита, а верхний — к наконечнику, связанному с южным полюсом. Тогда магнитный поток, который ранее направлялся из северного полюса в южный

непосредственно через верхние и нижние ветви полюсных наконечников, перераспределится, причем значительная часть его устремится через якорь в направлении, указанном на фигуре стрелкой, т. е. снизу вверх.

Достигнув максимального отклонения, якорь возвратится обратно и затем займет положение, указанное на фиг. 54,*в*. При этом верхний конец его окажется у северного полюса, а нижний — у южного, и магнитный поток, направляясь из северного полюса в южный, пойдет по якорю сверху вниз, т. е. переменит свое направление.

Величина проходящего по якорю магнитного потока не остается постоянной — по мере приближения якоря к полюсным наконечникам поток через него возрастает, так как при этом уменьшаются воздушные зазоры и магнитное сопротивление цепи падает.

Таким образом, по якорю непрерывно проходит переменный по величине и направлению магнитный поток, который индуктирует в катушке переменный электрический ток. Последний подается на усилитель и громкоговоритель для воспроизведения граммофонной записи.

Устройство, аналогичное звукоснимателю, так называемый рекордер, используется для записи звука на граммофонную пластинку или на пленку. Обмотка рекордера включается на выход усилителя, усиливающего микрофонные токи (при записи живого исполнителя) или тока звукоснимателя (при перезаписи).

Протекающий по обмотке рекордера ток создает переменное магнитное поле, которое намагничивает соответствующим образом якорь. Последний, взаимодействуя своим полем с полем полюсных наконечников, приходит в колебательное движение и увлекает за собой жестко связанный с ним резец, который и осуществляет запись.

Так как якорь рекордера должен преодолевать сопротивление, испытываемое резцом при снятии стружки в материале (воск, лак, целлулоид), то магнитная система рекордера делается более мощной, чем у звукоснимателя.

Магнитная запись звука. Знание рассмотренных выше основных законов, которым подчиняются магнитные явления, позволяет нам ознакомиться и с магнитной записью звука.

Магнитная запись звука может осуществляться на различных материалах, так называемых звуконосителях — на стальной проволоке, на медной проволоке с ферромагнит-

ным покрытием, на рулонной и листовой пленке, покрытой лаком, содержащим порошки ферромагнитных материалов, и т. д.

При записи на проволоку последняя с помощью специального механизма перемещается с определенной скоростью перед полюсами записывающей головки — электромагнита особой формы.

Обмотка электромагнита питается от усилителя переменного тока звуковой частоты, поступающего от микрофона или звукоснимателя. В силу этого у полюсов электромагнита создается переменное по величине и направлению магнитное поле. Это поле, воздействуя последовательно на проходящие перед полюсами электромагнита участки стальной проволоки, намагничивает их с различной полярностью и интенсивностью в соответствии с направлением и силой протекающего через обмотку электромагнита тока. Благодаря наличию у стали значительной коэрцитивной силы произведенные электромагнитом в проволоке магнитные изменения сохраняются длительное время.

Для воспроизведения сделанной записи проволока вновь протягивается с такой же скоростью перед другой — воспроизводящей головкой. Последовательно сменяющиеся поля различной полярности и интенсивности намагниченных участков проволоки индуктируют в электромагните переменные токи такой же частоты, какую имели токи, производившие запись. Так как магнитные поля отдельных участков проволоки имеют весьма малую величину, то индуктируемые ими слабые токи не могут быть использованы непосредственно для воспроизведения звука и их усиливают.

Записанный звук может быть «стерт», а проволока использована для повторной записи большое число раз. Стирание записи производится с помощью третьей головки — стирающего электромагнита, питаемого переменным током сверхзвуковой частоты. Мощное магнитное поле стирающей головки разрушает созданную при записи ориентировку элементарных магнитиков и возвращает их в первоначальное хаотическое состояние.

Магнитная запись звука на проволоку имеет ряд существенных недостатков, из-за которых она не получила широкого распространения. Расход проволоки велик: даже для сравнительно короткой записи в 10—15 мин. требуется достаточно большое количество проволоки, которая имеет значительные объем и вес. После определенного числа

перематываний проволока начинает обрываться, причем соединение между собой оборвавшихся кусков затруднительно вследствие упругости стали и невозможности пайки.

Наибольшее распространение благодаря своему высокому качеству получила магнитная запись на рулонную пленку. Существует два основных типа магнитной пленки: а) пленка, у которой порошкообразный ферромагнетик (магнетит Fe_3O_4, дающий черную пленку, или окись железа Fe_2O_3, дающая коричневую пленку), смешанный с изолирующим, клеящим лаком, нанесен в виде тонкого — в 15 — 20 микрон, слоя на ацетилцеллюлозную ленту; б) пленка, изготовленная из полихлорвинила, с которым ферромагнитный порошок смешивается и прокатывается в вальцах в процессе изготовления самой пленки.

Готовая пленка разрезается на узкие 6,5-*мм* и длинные до 1 000 *м* ленты, которые наматываются в рулоны.

Оба типа пленки, несколько отличаясь друг от друга магнитными, физическими и эксплоатационными данными, обеспечивают высокое качество записи звука с частотой до 10 000—12 000 *гц* при небольшом уровне шумов и незначительных искажениях.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом звукозаписи ведутся работы по изготовлению магнитной пленки на более дешевой бумажной основе.

Звук человеческого голоса и любого музыкального инструмента кроме основного тона содержит еще ряд более высоких тонов — гармоник, частота которых в 2, 3, 4 и вообще в целое число раз больше частоты основного тона. Наличие гармоник объясняется тем, что в звукообразовании участвует не только колеблющееся тело — голосовые связки, струны, столб воздуха в духовых инструментах, — но и связанные с ним элементы музыкальных инструментов или голосового аппарата, колебания которых накладываются на основные колебания. Гармоники придают звуку окраску, тембр. Поэтому, чтобы правильно записать звук с сохранением его тембра, необходимо записать не только основной тон, но и сопровождающие его гармоники, частота которых у многих музыкальных инструментов и у женских голосов достигает 10 000 — 12 000 *гц*.

Если бы мы протягивали магнитную проволоку или пленку перед полюсами электромагнита записывающей головки с малой скоростью, скажем со скоростью 1 *см/сек*, то при записи звука скрипки или виолончели с частотой

гармоник до 12 000 *гц* и больше нам пришлось бы на 1 *см* пленки зафиксировать все множество изменяющихся магнитных полей, создаваемых усиленными микрофонными токами такой высокой частоты. Естественно, что при такой малой скорости движения пленки быстро изменяющиеся магнитные поля наложились бы друг на друга и зафиксированная на пленке магнитная картина совершенно не соответствовала бы той, которая была создана электромагнитом записывающей головки. Воспроизведенный с такой записи звук очень мало походил бы на звук, который мы хотели записать. Поэтому для правильной без заметных искажений записи звука, содержащего высокочастотные гармоники, необходимо достаточно быстрое перемещение пленки, тем более быстрое, чем более высокие частоты необходимо записать. Практикой установлены три скорости перемещения пленки:

а) 18 *см/сек* при записи звука с частотами до 3 000 *гц* (запись речи);

б) 45,6 *см/сек* при записи звука с частотами до 8 000 *гц*;

в) 77 *см/сек* при записи звука с частотами до 12 000 *гц* (качественная запись музыки).

Таким образом, рулона пленки длиной в 1 000 *м* достаточно для записи речи в продолжение около 1 ½ час., а для качественной записи музыки — в продолжение 20 мин.

Простота процесса записи и воспроизведения, высокое качество звучания, возможность многократного использования пленки, возможность склейки ее отдельных кусков и монтажа записанного материала и относительно невысокая стоимость пленки привели в последние годы к широкому и быстрому распространению записи звука на магнитную пленку.

САМОИНДУКЦИЯ

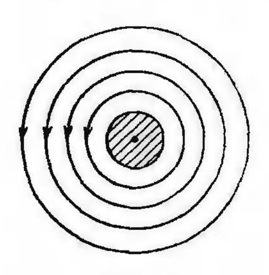
Как уже говорилось выше, при включении тока вокруг проводника создается магнитное поле. На фиг. 55 показаны разрез круглого проводника с током и образующиеся при этом силовые линии. При включении во время нарастания тока магнитное поле появляется, а при выключении тока — поле исчезает.

Эти изменения магнитного поля вокруг проводника вызывают появление в проводнике э. д. с. и соответствующего индуктированного тока. Это явление носит название с а м о-

индукции, а возникающие в проводе э. д. с. — э. д. с самоиндукции.

Индуктированный ток подчиняется закону Ленца: при нарастании основного тока индуктируемая э. д. с. самоиндукции и индуктированный ток направлены ему навстречу и противодействуют его нарастанию, при уменьшении — направлены в ту же сторону, что и основной ток, и противодействуют его исчезновению.

Коэффициент индуктивности. Величина возникающей при этом э. д. с. самоиндукции зависит от так называемого коэффициента индуктивности, который можно определить числом силовых линий, пересекающих проводник в 1 сек., если за эту секунду сила тока в проводнике изменяется на 1 *a*. Коэффициентом индуктивности, равным единице, обладает такой проводник, в котором при изменении силы протекающего тока на 1 *a* в 1 сек. возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 *в*.



Фиг. 55.

Такая единица носит название генри (сокращенное обозначение *гн*).

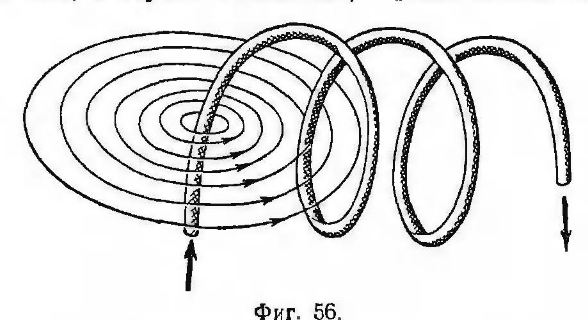
Одна тысячная часть генри называется миллигенри (1 *мгн* = 10^{-3} *гн*), одна миллионная — микрогенри (1 *мкгн* = 10^{-6} *гн*).

Если прямолинейный проводник свернуть в соленоид, то индуктивность проводника и э. д. с. самоиндукции, возникающая в нем при тех же изменениях силы тока, значительно возрастут, так как при этом создаваемые каждым витком силовые линии будут пересекать не только этот виток, но и соседние. Следовательно, в каждом витке э. д. с. самоиндукции получится за счет изменения силы тока не только в этом же самом, но и во всех других витках. Так как, кроме того, витки соленоида соединены последовательно, то э. д. с. самоиндукции отдельных витков складываются, и общий коэффициент индуктивности соленоида будет быстро расти с увеличением числа его витков, примерно пропорционально квадрату числа витков.

Но это верно только в том случае, если витки расположены близко друг к другу; тогда силовые линии, создаваемые каждым витком, пересекут большую часть всех остальных витков, и общая индуктивность при этом будет

велика. Если же витки расположены на значительном расстоянии друг от друга, то магнитное поле каждого витка захватит меньшее количество соседних витков, и индуктивность будет меньше (фиг. 56). При прочих равных условиях индуктивность соленоида будет зависеть от густоты намотки — от количества витков, приходящихся на 1 *см* его длины.

Общее число созданных силовых линий и, следовательно, индуктивность будут расти с увеличением длины проводника или, в случае соленоида, с увеличением диаметра



Фиг. 56.

его витков. Чем больше диаметр соленоида или иначе — площадь сечения его сердечника, тем больше его индуктивность.

Для подсчета коэффициента индуктивности катушек разной формы применяются специальные формулы, таблицы и номограммы. Ниже приводятся две формулы для катушек со стальным сердечником и без него.

Коэффициент индуктивности катушки без стального сердечника, намотанной в один слой, виток к витку, можно вычислять по формуле

$$L = \frac{23D^2w^2}{l\left(2{,}3 + \frac{D}{l}\right)} \cdot 10^{-3},$$

где L — коэффициент индуктивности, *мкгн*;
D — диаметр катушки, *см*;
w — число витков;
l — длина катушки (намотки), *см*.

Формула дает достаточно точные результаты для катушек, намотанных из проволоки с тонкой изоляцией (эмалевая, одинарная шелковая), так как при толстой изоляции

витки окажутся сравнительно далеко друг от друга, и при отношении длины к диаметру не более 5.

При введении в соленоид замкнутого стального сердечника количество силовых линий, создаваемых током и, следовательно, индуктивность увеличатся в μ раз. Но так как величина μ непостоянна (фиг. 29) и зависит от величины протекающего по соленоиду тока, т. е. от магнитной индукции, то индуктивность соленоида со стальным сердечником есть также величина непостоянная. Наибольшей величины индуктивность соленоида достигает при вполне определенной силе протекающего тока, соответствующей наибольшему значению проницаемости μ; при большей или меньшей величине тока индуктивность будет меньше.

Коэффицент индуктивности катушки с замкнутым стальным сердечником можно вычислять по формуле

$$L = \frac{4\pi w^2 \mu Q}{10^9 l},$$

где L — коэффициент индуктивности, *гн*;
w — число витков;
μ — проницаемость стали;
Q — поперечное сечение стального сердечника, *см*^{2};
l — средняя длина стального сердечника, *см*.

Индуктивное сопротивление. При пропускании переменного тока через катушку в ней, благодаря наличию самоиндукции, возникает э. д. с. самоиндукции. При постоянном токе величина проходящего через катушку тока определяется только ее активным сопротивлением и приложенным к ней напряжением. Так как при переменном токе кроме преодоления активного сопротивления проводника катушки необходимо преодолеть еще противодействующую э. д. с. самоиндукции, то для получения такой же силы переменного тока, как и постоянного, необходимо увеличить приложенное к катушке напряжение. При прежнем же напряжении сила тока окажется значительно меньшей. Это можно объяснить тем, что по отношению к переменному току катушка обладает некоторым добавочным сопротивлением. Это добавочное сопротивление, появляющееся только при пропускании через катушку переменного тока и обусловливаемое ее индуктивностью, называется индуктивным сопротивлением.

При прохождении электрического тока по проводнику, обладающему активным сопротивлением, часть энергии тока расходуется на тепло, которое выделяется в окружающее пространство и безвозвратно теряется.

Индуктивное сопротивление, в отличие от активного, не связано с потерями, так как электрическая энергия, затрачиваемая в момент включения тока на преодоление э. д. с. самоиндукции, переходит в энергию окружающего проводник магнитного поля и затем снова возвращается в виде электрической энергии при выключении, поддерживая исчезающий электрический ток. При включении проводника, обладающего индуктивным сопротивлением, в цепь переменного тока энергия, затрачиваемая на преодоление э. д. с. самоиндукции в первую четверть периода, когда ток нарастает, снова возвращается в цепь в течение второй четверти периода, когда ток уменьшается. Так как на индуктивное сопротивление мощность не расходуется, то его называют также реактивным или безваттным сопротивлением.

При увеличении частоты переменного тока скорость изменения магнитного потока, а следовательно, и число силовых линий, пересекающих катушку за 1 сек., увеличится; увеличатся также э. д. с. самоиндукции и добавочное сопротивление, оказываемое катушкой току. Индуктивное сопротивление увеличивается вместе с увеличением частоты.

Индуктивное сопротивление катушки переменному току определяется формулой

$$X_L = 2\pi f L,$$

где X_L — индуктивное сопротивление, *ом*;
f — частота переменного тока, *гц*;
L — индуктивность катушки, *гн*.

Полное, так называемое кажущееся сопротивление, которое оказывает катушка переменному току, т. е. результат совместного действия активного и индуктивного сопротивлений катушки, определяется из формулы

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

где Z — полное или кажущееся сопротивление катушки, *ом*;
R — активное сопротивление проводника катушки, *ом*;
X_L — индуктивное сопротивление катушки, *ом*.

При переменном токе сила тока в электрической цепи с индуктивностью определяется известным законом Ома, с той, однако, разницей, что вместо R — активного сопротивления — нужно ввести кажущееся (полное) Z:

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Поясним на примерах, какое влияние оказывает индуктивность на величину полного сопротивления катушки и на силу протекающего по ней тока при разных частотах и при введении в нее стального сердечника.

Пусть имеется катушка диаметром $D = 50$ *мм* (5 *см*), с длиной намотки $l = 11$ *см*, состоящая из 200 витков эмалированной проволоки $d = 0{,}5$ *мм*.

Длина одного витка катушки равна:

$$\pi D = 3{,}14 \cdot 5 = 15{,}7 \text{ см}.$$

Полная длина проволоки равна:

$$15{,}7 \cdot 200 = 3\,140 \text{ см} = 31{,}4 \text{ м}.$$

Сечение проволоки

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}5^2}{4} \approx 0{,}196 \text{ мм}^2.$$

При удельном сопротивлении меди $\rho = 0{,}0175$ активное сопротивление катушки будет равно:

$$R = \frac{\rho l}{q} = \frac{0{,}0175 \cdot 31{,}4}{0{,}196} \approx 2{,}8 \text{ ом}.$$

При включении катушки на источник постоянного тока с напряжением 10 *в* по ней пойдет ток

$$I = \frac{10}{2{,}8} \approx 3{,}6 \text{ а}.$$

По приведенной выше формуле

$$L = \frac{23\, D^2 w^2}{l\left(2{,}3 + \frac{D}{l}\right)} \cdot 10^{-3} \text{ мкгн}$$

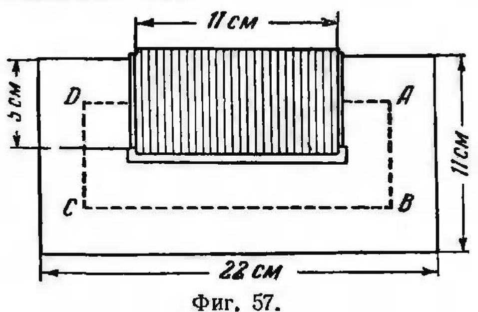
определим индуктивность катушки

$$L = \frac{23 \cdot 5^2 \cdot 200^2 \cdot 10^{-3}}{11\left(2{,}3 + \frac{5}{11}\right)} = 770 \text{ мкгн} = 0{,}00077 \text{ гн}.$$

Индуктивное сопротивление катушки переменному току с частотой 50 *гц* будет равно:

$$X_L = 2\pi fL = 6,28 \cdot 50 \cdot 0,00077 \approx 0,24 \text{ ом},$$

что по сравнению с 2,8 *ом* сопротивления катушки постоянному току представляет незначительную величину, которая не повлияет заметным образом на величину кажущегося сопротивления катушки и на силу протекающего тока.



Фиг. 57.

Посмотрим теперь, чему будет равно сопротивление этой же катушки при высокой частоте 500 000 *гц* (частота, применяемая при передаче радиосигналов, соответствующая длине волны 600 *м*):

$$X_L = 2\pi fL = 6,28 \cdot 500\,000 \cdot 0,00077 \approx 2\,400 \text{ ом},$$

что почти в 1 000 раз больше сопротивления той же катушки постоянному току.

Полное сопротивление катушки

$$Z = \sqrt{2\,400^2 + 2,8^2}$$

почти не будет отличаться от ее индуктивного сопротивления, и сила тока при напряжении в 10 *в* будет равна:

$$I = \frac{10}{2\,400} \approx 0,004 \text{ а}.$$

В значительной степени возрастет сопротивление катушки при прежней частоте 50 *гц*, но при введении в нее замкнутого стального сердечника (фиг. 57).

Определив показанную на чертеже пунктиром среднюю длину сердечника l — пути силовых линий — в 46 *см* и приняв $\mu = 1\,500$, получим:

$$L = \frac{4\pi w^2 \mu Q}{10^9 l} = \frac{12,56 \cdot 200^2 \cdot 1\,500 \cdot 19,6}{10^9 \cdot 46} \approx 0,32 \text{ гн}.$$

Отсюда

$$X_L = 2\pi fL = 6,28 \cdot 50 \cdot 0,32 = 100 \text{ ом},$$

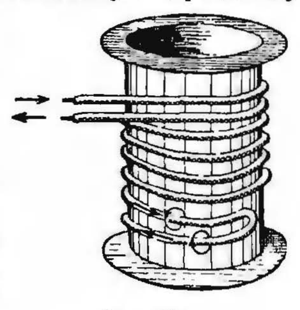
Кажущееся сопротивление катушки

$$Z = \sqrt{100^2 + 2{,}8^2}$$

также уже почти не будет отличаться от индуктивного, и через катушку потечет ток

$$I = \frac{10}{100} = 0{,}1 \ a.$$

В некоторых случаях, например в катушках, которые должны служить только в качестве активных сопротивлений, наличие индуктивности у катушки является нежелательным. Для уменьшения индуктивности наматываемую проволоку складывают вдвое и ведут намотку сложенной проволокой (фиг. 58). Такая намотка называется бифилярной.



Фиг. 58.

Так как обе половины сложенной проволоки наматываются рядом и по ним течет ток в противоположных направлениях, то магнитные поля обеих половин будут направлены противоположно, вследствие чего они значительно ослабят и почти уничтожат друг друга. Поэтому катушки с бифилярной намоткой почти не имеют индуктивности.

Экстраток размыкания. При прохождении тока через катушку часть электрической энергии затрачивается на создание магнитного поля. При наличии в катушке стального сердечника, при большом количестве витков и большой силе протекающего тока значительная часть электрической энергии перейдет в энергию магнитного поля, которое может достигнуть большой величины. При прекращении тока магнитная энергия поля израсходуется на поддержание исчезающего тока. Если сразу разомкнуть питающую цепь, то магнитное поле начнет очень быстро уменьшаться, в силу чего в катушке возникнет большая э. д. с. самоиндукции. Электродвижущая сила самоиндукции, возникающая при размыкании электрической цепи, и обусловленный ею ток, так называемый экстраток размыкания, могут достигать весьма больших значений. При небольшом расстоянии между концами разомкнутой цепи возникнет электрическая дуга и может произойти пробой изоляции обмотки. Возникновение такой электрической дуги можно часто наблюдать у трамваев и моторных вагонов электрических

железных дорог при отскакивании дуги или пантографа от токонесущего провода.

Магнитные усилители. При включении первичной обмотки трансформатора в цепь переменного тока, во вторичной его обмотке, по закону электромагнитной индукции, появляется индуктированная э. д. с. Если вторичная обмотка трансформатора не замкнута, то по первичной обмотке протекает холостой ток, величина которого определяется ее кажущимся сопротивлением, т. е. в основном ее индуктивным сопротивлением. При включении вторичной обмотки на какую-либо нагрузку по ней начинает течь индуктированный ток, который, по закону Ленца, имеет противоположное направление. Поэтому магнитное поле тока вторичной обмотки будет уменьшать магнитное поле первичной обмотки и проницаемость сердечника, что приведет к уменьшению ее индуктивности (которая зависит от проницаемости сердечника), а следовательно, и ее индуктивного сопротивления. Вследствие этого сила тока в первичной обмотке трансформатора возрастет.

Свойство катушек с ферромагнитным сердечником изменять свое индуктивное сопротивление в зависимости от степени намагничения сердечника использовано в магнитных усилителях — устройствах, которые позволяют с помощью маломощного постоянного тока управлять мощными переменными токами, Простейший магнитный усилитель представляет собой сердечник, изготовленный из ферромагнитного материала с большой проницаемостью (фиг. 59), на котором помещены две обмотки: управляющая обмотка постоянного тока *I* и состоящая из двух секций управляемая обмотка переменного тока *II*.

Сила переменного тока, протекающего по обмотке *II*, в основном определяется ее индуктивным сопротивлением X_L:

$$I=\frac{U}{X_L}.$$

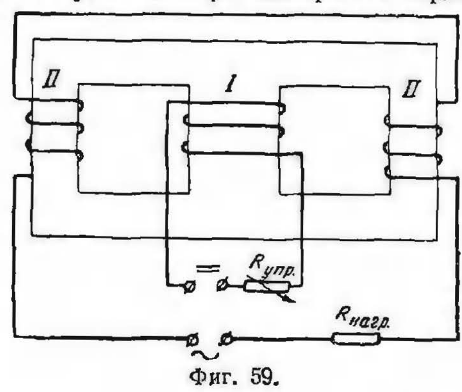
Активным сопротивлением в данном случае можно пренебречь, так как оно сравнительно с индуктивным мало.

Индуктивное сопротивление вторичной обмотки определяется коэффициентом ее индуктивности, который в свою очередь зависит от величины проницаемости сердечника. Таким образом, сила переменного тока, протекающего во вторичной обмотке, в конечном итоге будет определяться величиной магнитной проницаемости сердечника, которую

можно изменять путем изменения магнитного поля, создаваемого током обмотки *I*.

Для этой цели служит переменное сопротивление — $R_{упр}$.

Проницаемость ферромагнитных материалов мала при малых плотностях магнитного потока (см. кривую в разделе «Проницаемость»), при средних плотностях она достигает своего максимального значения, а при насыщении сердечника становится совсем незначительной. При расчете магнитного усилителя путем выбора материала сердечника и его



Фиг. 59.

сечения проницаемость подбирается так, чтобы при отсутствии тока в управляющей обмотке или при малой его величине индуктивное сопротивление обмотки переменного тока было достаточно велико, а ток в ней мал. При увеличении тока управляющей обмотки сердечник насыщается, проницаемость падает, а индуктивность и, следовательно, индуктивное сопротивление вторичной обмотки уменьшаются, что приводит к увеличению силы переменного тока.

Обмотки располагаются и включаются так, чтобы сумма э. д. с., индуктируемых в управляющей обмотке магнитными потоками управляемой обмотки, была равна нулю.

В качестве $R_{\cdot пп}$ в магнитных усилителях мощности используются устройства, изменяющиеся токи которых необходимо усилить.

Коэффициент усиления или точнее коэффициент управления магнитного усилителя определяется отношением ампервитков обмоток переменного и постоянного тока

$$K = \frac{wI_{перем}}{wI_{пост}}.$$

Коэффициент управления магнитного усилителя может быть увеличен путем применения обратной связи. Для этого некоторая часть тока обмотки *II* выпрямляется и подается на специальную дополнительную обмотку, магнитное поле которой, подмагничивая сердечник, позволяет уменьшить ток и мощность, затрачиваемую в обмотке *I*.

Магнитные усилители во многих случаях могут заменить усилители с электронными лампами, перед которыми они имеют серьезные преимущества. Магнитные усилители не боятся толчков и сотрясений, работают неограниченно долгое время, не требуя ремонта или замены каких-либо частей, позволяют усиливать очень большие токи, обладают высокой чувствительностью, реагируя на напряжения в несколько микровольт, имеют высокий к. п. д. Коэффициент усиления по мощности у магнитных усилителей достигает 10 000 и более. Мощность их ничем кроме размеров не ограничивается; имеются проекты магнитных усилителей мощностью до нескольких десятков тысяч киловатт. В отличие от электронных ламп, активное сопротивление которых приводит к значительным внутренним потерям, тепловые потери у магнитных усилителей незначительны, так как их сопротивление в основном является индуктивным.

Уже сейчас магнитные усилители применяются во многих отраслях народного хозяйства, в частности в различных автоматических устройствах и сервомеханизмах. Особенно многообещающим представляется использование магнитных усилителей в хозяйстве связи, в частности для работы с подземными и подводными кабелями, с которыми они могут быть уложены вместе.

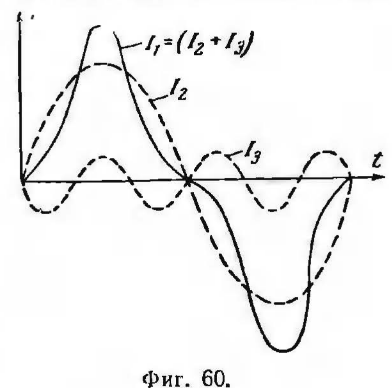
Недостатком магнитных усилителей является наличие у них известной инерции. При питании переменным током с частотой 60 *гц* время срабатывания составляет 0,1 сек., а при частоте 333 *гц*—0,05 сек.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С НАСЫЩЕННЫМ СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Сила переменного тока, протекающего по катушке со стальным сердечником, при постоянном напряжении на концах катушки определяется ее кажущимся сопротивлением Z, которое, в свою очередь, зависит от индуктивного сопротивления X_L. Последнее же зависит от индуктивности катушки, которая, будучи связанной с переменной величиной μ, яв-

ляется также величиной переменной. В силу этого кажущееся сопротивление катушки со стальным сердечником может менять свою величину в зависимости от изменения силы тока, протекающего по катушке, и связанного с ним изменения величины μ.

При значительной силе проходящего по катушке тока стальной сердечник может достигнуть насыщения, что повлечет за собой резкое уменьшение μ, индуктивного сопротивления катушки X, а также соответствующее возрастание тока в ней. Такие явления нередко наблюдаются в электрических цепях переменного тока, имеющих катушку с стальным сердечником (трансформаторы), дроссели и т. п.).



Фиг. 60.

Переменный ток, протекающий по электрической цепи, не содержащей катушки со стальным сердечником, изображается синусоидой, при наличии же катушки с насыщающимся сердечником кривая тока не будет иметь нормального синусоидального вида. Действительно, когда ток достигает значительной силы, сталь приближается к насыщению, кажущееся сопротивление катушки падает, а ток сильно возрастает, на синусоиде появляются пики и впадины. Следовательно, стальной сердечник, работающий при насыщении, искажает форму протекающего по цепи тока.

Всякое периодическое колебание несинусоидальной формы может быть разложено на ряд синусоидальных колебаний (так называемый ряд Фурье). Например, периодическое колебание силы тока, изображенной кривой I_1 (фиг. 60), может быть представлено в виде суммы двух синусоидальных колебаний, изображенных кривыми:

I_2 — с периодом, равным периоду I_1 и I_3 — с периодом, втрое меньшим. Непосредственным сложнением ординат I_2 и I_3 можно убедиться, что

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Колебание, имеющее втрое большую частоту, называется **третьей гармоникой**.

Искажения формы кривой тока, вносимые стальным сердечником при достижении им насыщения, имеют примерно такой же характер, как и искажения кривой I_1, приведенной на фиг. 60. При максимально допустимой для трансформаторной стали среднего качества индукции в 10 000 *гс* амплитуда основной синусоиды составляет около 80%, а третьей гармоники — 15%. При увеличении индукции до 20 000 *гс* амплитуда основной синусоиды падает до 50%, а третьей гармоники возрастает до 40%.

Наличие стального сердечника, достигающего насыщения, всегда вызывает появление сильной третьей гармоники, которая может причинить ряд неприятностей в электрических цепях: при наличии случайных резонансов может вызвать пробой изоляции обмотки, исказить звук, если процесс происходит в низкочастотных цепях приемника или усилителя, и т. д.

При включении в фильтр выпрямителя катушки со стальным сердечником в качестве сглаживающего дросселя по ней проходят постоянная и переменная слагающие выпрямленного пульсирующего тока. Если постоянная слагающая тока настолько велика, что создаваемое ею магнитное поле доводит сердечник до насыщения, то индуктивность катушки и ее индуктивное сопротивление падают и она оказывается не в состоянии нормально выполнить свою роль фильтра для переменной слагающей.

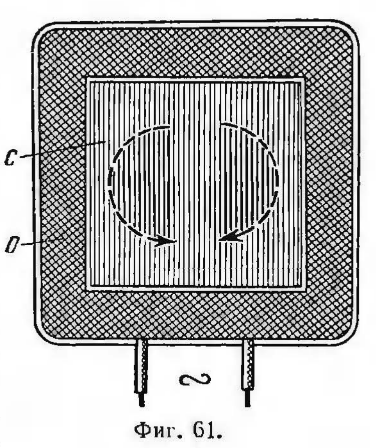
ПОТЕРИ В СТАЛЬНОМ СЕРДЕЧНИКЕ И БОРЬБА С НИМИ

Вихревые токи. При прохождении переменного электрического тока через катушку со стальным сердечником в последнем, благодаря пересечению его переменным магнитным полем, возникают индуктированные электрические токи, которые носят название **вихревых токов**. Эти токи замыкаются внутри проводника, причем на их создание тратится часть энергии источника переменного тока, которая выделяется в сердечнике в виде тепла. На фиг. 61 показан разрез катушки с обмоткой *O* и сердечником *C*.

Если сердечник изготовить из сплошного куска стали с малым электрическим сопротивлением, то при питании катушки переменным током в нем возникнут вихревые токи, схематически отмеченные на фигуре пунктиром.

Индуктирование вихревых токов в массивном проводнике произойдет также при вращении проводника в магнитном поле, например при вращении в поле электромагнита массивного стального якоря электродвигателя, генератора и т. д. В теле якоря, как и в витке проволоки, при вращении будет возникать электрический ток (фиг. 62,*а*).

В электрических машинах и трансформаторах вихревые токи являются вредными, так как на их создание бесполезно затрачивается значительное количество энергии. При этом производимый ими нагрев сердечника может достигнуть опасной величины.



Фиг. 61.

Вихревые токи, как и всякие индуктированные токи, стремятся противодействовать вызвавшей их силе. Поэтому в генераторе они будут оказывать тормозящее противодействие вращению якоря.

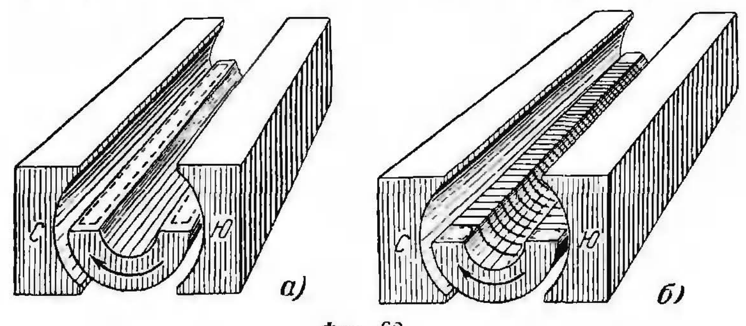
Для уменьшения вихревых токов в электрических машинах и трансформаторах не применяют сплошные массивные части магнитопровода, а делают их из тонких (0,3—0,5 *мм*), изолированных друг от друга бумагой или лаком листов стали (фиг. 61 и 62,*б*), в которую при ее изготовлении вводятся специальные примеси, увеличивающие ее удельное электрическое сопротивление (см. гл. 4).

Электродвижущие силы, возникающие в отдельных тонких слоях стали, будут малы, и поэтому вихревые токи будут гораздо слабее, чем в сплошных проводниках.

Во многих случаях вихревые токи используются для полезной работы. В электрических счетчиках этими токами пользуются для торможения ротора двигателя, производящего отсчет израсходованной электроэнергии. Для этой цели на оси ротора укрепляется алюминиевый диск, который вращается между полюсами постоянного магнита. Так как диск движется в магнитном поле, то в нем индуктируются вихревые токи. Магнитное поле этих токов направлено против поля магнита, вследствие чего диск тормозится. При выключении текущего через счетчик тока это приводит к бы-

строй остановке ротора, который иначе благодаря инерции продолжал бы вращаться, заставляя счетчик давать неправильные показания.

Вихревые токи во многих случаях используются также и на производстве, в частности при изготовлении радиоламп. Радиолампы могут нормально работать только при условии высокого вакуума, который достигается тщательной откачкой воздуха и различных газов не только из пространства внутри стеклянного баллона, но и из электродов, которыми газы поглощаются в процессе производства металла. Уда-



Фиг. 62.

ление этих газов может быть достигнуто только при сильном нагреве электродов, который осуществляется с помощью вихревых токов. Для этого на лампу во время ее откачки надевают катушку, питаемую током высокой частоты; переменное магнитное поле ее индуктирует во всех металлических частях лампы мощные вихревые токи, которые нагревают металл до белого каления. Выделившиеся при этом газы удаляются насосом.

Вихревые токи используются также в металлургии для производства качественных сталей и сплавов. Для этого тигель, в котором находятся отвешенные в нужных количествах металлы (железо, хром, вольфрам, кобальт и др.), помещают в катушку, питаемую переменным током высокой частоты. Возникающие в металле вихревые токи не только плавят металл, но и тщательно его перемешивают. В таких высокочастотных печах выплавляют сталь и сплавы высокого качества, не содержащие вредных посторонних примесей.

С помощью вихревых токов может осуществляться также поверхностная закалка стальных изделий. Многие детали

машин в процессе их эксплоатации испытывают большие нагрузки на поверхность. Такую тяжелую нагрузку несет, например, поверхность зубьев шестерен, с помощью которых производится передача больших мощностей. Обычная закалка шестерен путем нагрева в печи с последующим быстрым охлаждением хотя и повышает твердость и износоустойчивость поверхности зубьев, но одновременно увеличивает хрупкость всего изделия, что может привести к поломкам.

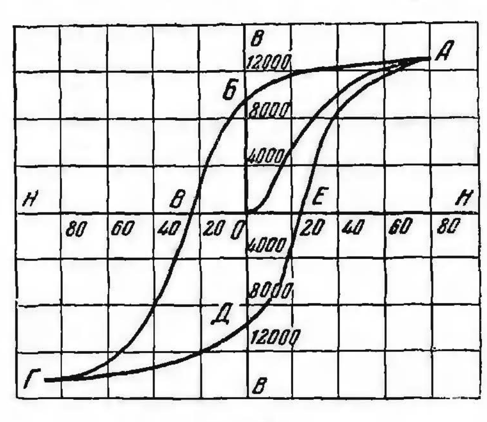
Вихревые токи, индуктируемые магнитным полем высокой частоты (в сотни и тысячи килогерц), благодаря поверхностному эффекту текут только в поверхностных слоях, не проникая в глубь металла. При достаточной мощности высокочастотного магнитного поля вихревые токи достигают большой величины, нагревая поверхность до высокой температуры настолько быстро, что тепло не успевает распространиться внутрь изделия. При быстром охлаждении нагретой таким образом детали ее поверхность приобретает высокую твердость, а внутренняя часть остается мягкой и не боится изломов из-за хрупкости. Кроме того, закаливаемое изделие не успевает окислиться и не покрывается окалиной.

Большие достижения в разработке и усовершенствовании способов высокачастотной поверхностной закалки стали являются результатом длительной и плодотворной работы советских ученых, в том числе лауреатов Сталинской премии В. П. Вологдина, Г. И. Бабата, М. Г. Лозинского, Е. В. Родина и др.

Гистерезис. Как бы ни была мягка сталь, в ней всегда после намагничивания сохраняется некоторый остаточный магнетизм, который определяет собой поведение ее в переменном магнитном поле. Выше, в гл. 2, уже говорилось, что под влиянием внешнего магнитного поля элементарные магнитики ориентируются соответствующим образом, причем для преодоления препятствующей этой ориентировке коэрцитивной силы требуется затрата определенной энергии.

Поместим стальной сердечник, собранный из тонких листов трансформаторной стали, в катушку и присоединим ее через реостат к какому-либо источнику постоянного тока. При увеличении протекающего через катушку тока будет расти напряженность создаваемого им поля и до известного предела магнитная индукция в стали. Если эту зависимость между напряженностью магнитного поля и индукцией в ста-

ли изобразить графически и по горизонтальной оси отложить величину напряженности поля H, а по вертикальной оси — магнитную индукцию B, то получится уже знакомая нам кривая OA (фиг. 63). Верхний загиб кривой около точки A показывает, что при этих значениях H сталь уже полностью намагнитилась и дальнейший рост индукции прекратился, так как все элементарные магнитики уже ориентированы. Если после этого начать уменьшать силу тока, то вместе с ним станет уменьшаться и напряженность поля,



Фиг. 63.

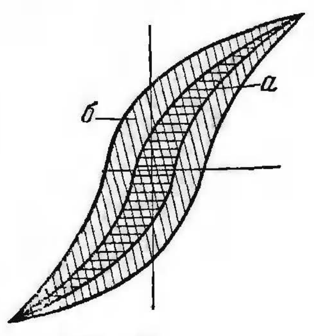
причем величина индукции на этом обратном пути при тех же значениях H будет немного больше полученной на прямом пути. Это происходит за счет индукции, обусловленной остаточным магнетизмом. Изменение индукции при уменьшении тока пойдет по кривой $AБ$. При отсутствии намагничивающего поля индукция в стали все же сохранит некоторую величину $OБ$, определяемую величиной остаточного магнетизма. Для полного размагничивания стали нужно приложить магнитное поле противоположного направления (путем изменения направления тока) и довести его до величины, определяемой отрезком $OВ$.

Это явление, при котором индукция в стали во время перемагничивания как бы отстает от напряженности поля, называется **г и с т е р е з и с о м**. При дальнейшем увеличении поля в обратном направлении индукция будет изменяться по кривой $ВГ$, а при последующем уменьшении — по кривой $ГД$. Как и в первом случае, при отсутствии тока и магнит-

ного поля индукция сохранит определенную величину *ОД*, и для ее уничтожения придется снова переменить направление тока и магнитного поля. Напряженность поля на этот раз должна быть доведена до величины *ОЕ*.

Кривая *АБВГДЕА*, получившаяся после полного цикла перемагничивания стали, называется **гистерезисной петлей**.

На намагничивание стали затрачивается некоторая энергия; наоборот, при размагничивании сталь должна отдавать эту энергию. Однако вследствие явления гистерезиса энергия, затрачиваемая на намагничивание, оказывается большей, чем отдаваемая сталью при размагничивании. Разница в этих количествах энергии идет на нагревание стали и представляет собой потери на перемагничивание. Величину потерь стремятся уменьшить, применяя возможно более мягкую сталь, обладающую наименьшим остаточным магнетизмом.



Фиг. 64.

Потери тем значительнее, чем больше величина остаточного магнетизма, т. е. отрезков *ОБ* и *ОД*, а чем больше эти отрезки, тем больше площадь петли. Следовательно, площадь гистерезисной петли пропорциональна потерям. В мягких материалах с малой коэрцитивной силой и малым остаточным магнетизмом площадь гистеризистой петли будет меньше, чем в твердых, где эта величина больше. Величина площади гистерезисной петли может служить мерой качества стали и возникающих в ней при перемагничивании потерь. На фиг. 64 показаны для сравнения гистерезисные петли мягкой (а) и твердой (*б*) стали.

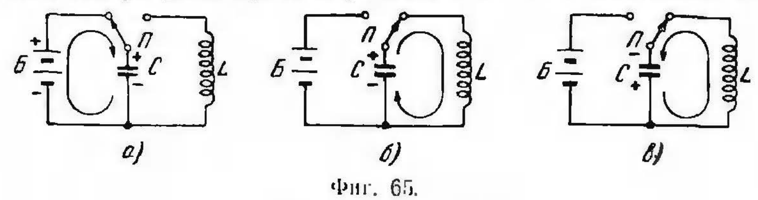
МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРАХ

На фиг. 65 схематически показан применяемый в радиоприемниках и других устройствах колебательный контур, состоящий из конденсатора *C* и катушки индуктивности *L*. Источником постоянного тока для заряда конденсатора служит батарея *Б*; переключатель *П* позволяет подключать конденсатор поочередно то к батарее для заряда, то к ка-

тушке для разряда. Направление электрического тока в цепях при заряде и разряде показано стрелкой.

При установке переключателя в левое положение конденсатор зарядится, и в электрическом поле между его обкладками сосредоточится определенный запас электрической энергии[1].

Переведем переключатель в правое положение, дав возможность конденсатору разрядиться через катушку L (фиг. 65,*б*). Если бы катушка не обладала индуктивностью, то в цепи мгновенно возник бы большой, постепенно спадающий ток, который продолжался бы до тех пор, пока конденсатор не разрядился. Благодаря же наличию индуктивности ток разряда будет нарастать постепенно, создавая во-



Фиг. 65.

круг катушки постепенно нарастающее магнитное поле. Когда ток достигнет своего максимального значения, конденсатор будет полностью разряжен, и вся энергия, полученная им от батареи, окажется сконцентрированной в магнитном поле катушки[2].

Когда конденсатор разрядился, ток в цепи должен был бы исчезнуть. Однако индуктивность катушки, как мы уже знаем, будет противодействовать исчезновению тока и за счет энергии магнитного поля будет поддерживать его еще некоторое время. Наконец, ток прекратится, а конденсатор окажется перезаряженным, после чего начнется новый разряд, но уже в противоположном направлении (фиг. 65,*в*).

Этот процесс непрерывного перехода энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катуш-

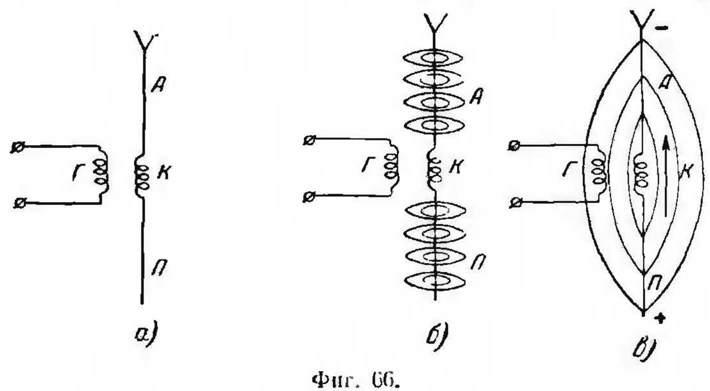
---

[1] Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле $A=\frac{CU^2}{2}$, где C — величина емкости конденсатора, а U — напряжение на его обкладках.

[2] Энергия магнитного поля катушки определяется по формуле $A=\frac{LI^2}{2}$, где L — коэффициент индуктивности катушки, а I — сила тока, протекающего в ней.

ки, и наоборот, будет продолжаться до тех пор, пока вся энергия, запасенная конденсатором от батареи, не израсходуется на потери, в основном на нагрев проводов и диэлектрика конденсатора.

На фиг. 66 схематически показан открытый колебательный контур радиопередающего устройства, состоящий из антенны *А*, противовеса *П* и катушки индуктивности *К*. Емкость конденсатора здесь заменена емкостью между проводами антенны и противовеса. Благодаря большой длине этих проводов кроме индуктивности катушки приходится также учитывать и их индуктивность, тогда как при рас-



Фиг. 66.

смотрении явлений в закрытом колебательном контуре мы учитывали только индуктивность катушки, пренебрегая индуктивностью небольших соединительных проводников.

Буквой *Г* на фигуре обозначена катушка связи с генератором, с помощью которой энергия колебания высокой частоты передается от него в контур. Катушка связи *Г* и катушка индуктивности контура *К* образуют трансформатор высокой частоты.

Рассмотрим явления, происходящие в антенном контуре за один полупериод тока, создаваемого генератором. В начале полупериода, когда ток в обмотке *Г* проходит через нуль, магнитное поле этой обмотки тоже равно нулю и во вторичной обмотке, т. е. в антенном контуре, ток не индуктируется. Затем в обмотке *Г* появляется и начинает расти магнитное поле, которое создает в обмотке *К* индуктированный ток. Последний, как и всякий ток, создает вокруг проводов антенны и противовеса магнитное поле (фиг. 66,б).

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение электронов, направление которых обратно направлению тока. Во время прохождения тока по антенной цепи электроны перемещаются из одного конца цепи в другой, например, в рассматриваемый полупериод — из нижнего конца противовеса в верхний конец антенны. Направление движения электронов показано стрелкой на фиг. 66,*в*. В силу этого к моменту прекращения тока в конце полупериода на верхнем конце антенны образуется избыток электронов, т. е. отрицательный электрический заряд, а на нижнем конце противовеса — недостаток их, т. е. положительный заряд. По известным законам физики между этими разноименными зарядами возникает электрическое поле, перпендикулярное к исчезнувшему магнитному полю. Таким образом, когда по антенной цепи протекает ток, вокруг антенны возникает магнитное поле; по мере того как к концу полупериода ток уменьшается до нуля, энергия магнитного поля постепенно переходит в энергию электрического поля, обусловленного возникшими электрическими зарядами. В следующий полупериод направление тока и полярность зарядов, а следовательно, и направления магнитного и электрического полей изменятся на обратные.

Эти взаимно меняющиеся электрические и магнитные поля образуют так называемое электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве вокруг антенны со скоростью света.

МАГНИТОСТРИКЦИЯ

Если ферромагнитное тело поместить в магнитное поле, то его геометрические размеры и объем изменятся. С другой стороны, всякое деформирование ферромагнитного тела (растяжение, сжатие, изгибание, скручивание) приводит к изменению его магнитных свойств, в частности проницаемости. Эти явления носят название прямого и обратного эффекта магнитострикции.

Знак изменения размеров помещенного в магнитное поле ферромагнитного тела, т. е. увеличение или уменьшение размеров и величина изменения их, определяются многими факторами: самим материалом, величиной магнитного поля, температурой тела и т. д. Сплавы железа с никелем при содержании никеля до 80% дают в магнитном поле удлинение; при большем количестве никеля происходит укорочение тела. Наиболее сильно магнитострикция выражена у чисто-

го никеля, который при полях любой величины дает укорочение.

Величина напряженности магнитного поля оказывает на величину и знак магнитострикции большое влияние. Так, например, стальной стержень, намагничиваемый вдоль оси, при напряженности поля до 100 *э* удлиняется, а затем, по мере усиления поля, начинает укорачиваться.

Температура также оказывает большое влияние на магнитострикцию: железо, например, при 186° С дает в магнитном поле значительное укорочение; при повышении температуры с 200 до 600° С происходит постепенно увеличивающееся удлинение. При температуре, близкой к точке магнитного превращения, магнитострикционные явления исчезают.

От направления магнитного поля знак и величина магнитострикции не зависят.

Если ферромагнитный стержень поместить в переменное магнитное поле, то длина его будет периодически изменяться, т. е. стержень будет совершать механические колебания.

При совпадении частоты переменного магнитного поля с собственной частотой стержня эти колебания будут наиболее интенсивными. В мощных полях колебания становятся настолько сильными, что стержень разрывается. При помещении в низкочастотное магнитное поле стержень издает сильный звук строго определенной частоты.

Если поместить стержень в катушку колебательного контура генератора, частота которого соответствует собственной частоте колебаний стержня, то последний стабилизирует частоту генератора с довольно большой точностью (до 0,01%). При помощи магнитострикционного стержня можно стабилизировать колебания довольно низкой частоты, порядка 2 000—3 000 *гц*, чего нельзя получить при помощи кварца, так как в этом случае размеры кварцевых пластин были бы весьма велики.

Обратный эффект магнитострикции используется для измерения небольших механических деформаций, возникающих в различных сооружениях и конструкциях, а также для других целей. Сконструированный советским инженером Майоровым прибор для измерения деформаций представляет собой тонкую пластинку из ферромагнитного материала (пермаллой), на которую намотано 100—200 витков тонкой медной проволоки. Пластинка с помощью клея или олова

закрепляется на детали, деформацию которой надо измерить, а катушка подключается к источнику переменного тока, например ламповому генератору. При деформации исследуемой детали деформируется также и укрепленная на ней пермаллоевая пластинка, в результате чего меняются также ее магнитная проницаемость, а следовательно, и индуктивное сопротивление находящейся на ней обмотки. Степень изменения индуктивного сопротивления обмотки позволяет судить о величине деформации.

На использовании обратного эффекта магнитострикции основана работа магнитострикционного звукоснимателя, в котором колебания иглы, скользящей по бороздкам граммофонной пластинки, создают деформацию ферромагнитной полоски, жестко связанной с иглой. По обе стороны зажима иглы на полоску намотаны две электрически связанные между собой катушки из тонкой проволоки, которые подключаются к усилителю. Полоска закреплена между полюсами постоянного магнита и, следовательно, через нее проходит часть магнитного потока. При деформации полоски ее магнитная проницаемость и, значит, проходящий через полоску магнитный поток изменяются, что приводит к возникновению в катушках индуктированной э. д. с., которая подается для дальнейшего усиления и воспроизведения звука на усилитель и громкоговоритель.

Теории, удовлетворительно объясняющей явление магнитострикции, не существует. Можно предположить, что происходящая под влиянием внешнего магнитного поля переориентировка электронных орбит изменяет геометрические размеры атомов и составленных из них молекул, а следовательно, и размеры самого тела. При механических же деформациях тела изменяется относительное положение молекул и их магнитных полей, что приводит к изменению магнитных свойств тела.

ПРОСТЕЙШИЕ РАСЧЕТЫ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Полный расчет приборов, содержащих магнитные цепи, довольно сложен. Благодаря тому, что при этом приходится иметь дело с рядом взаимнозависящих переменных величин (ампервитки, индукция, проницаемость и т. д.), расчет ведут, задаваясь значениями некоторых неизвестных величин, и путем последовательных приближений приходят к оптимальному варианту, т. е. к наилучшей комбинации.

Для расчета магнитной цепи можно применять соотношение, аналогичное закону Ома, применяемому в электрических цепях,

$$\Phi = \frac{E_м}{R_м},$$

где Ф — полный магнитный поток, создаваемый электрическим током в катушке со стальным сердечником;

$E_м$ — так называемая магнитодвижущая сила (м. д. с.), равная $0{,}4\pi \dot{I} w$;

$R_м$ — сопротивление магнитной цепи.

Приведенное соотношение указывает на то, что величина потока силовых линий в магнитной цепи прямо пропорциональна м. д. с. и обратно пропорциональна магнитному сопротивлению цепи.

Сопротивление, которое оказывает магнитная цепь потоку, зависит от ее длины, поперечного сечения и от проницаемости среды μ. Оно тем выше, чем больше длина магнитной цепи и чем меньше ее сечение и проницаемость. В замкнутой магнитной цепи

$$R_м = \frac{l}{\mu Q},$$

где l — длина магнитной цепи (сердечника) катушки, *см* (средняя длина магнитной силовой линии);

μ — проницаемость стали при данной индукции;

Q — поперечное сечение сердечника, *см*^{2}.

Здесь уместно вспомнить формулу сопротивления проводника электрическому току:

$$R = \frac{l}{\delta Q},$$

где l — длина проводника;

Q — его сечение;

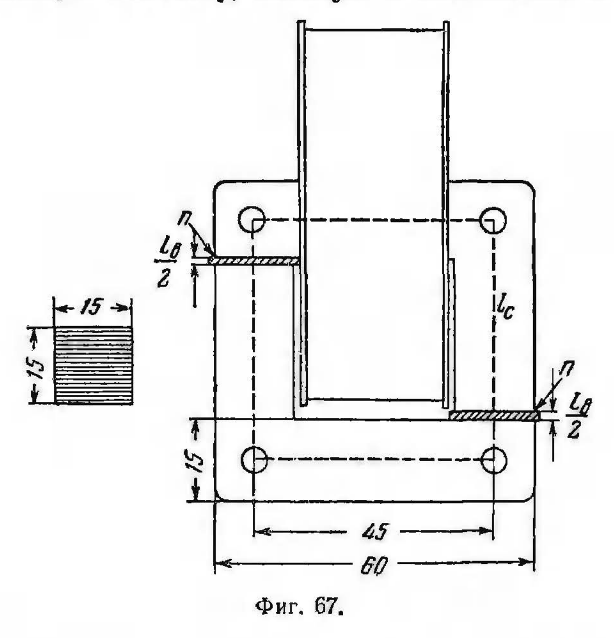
δ — удельная проводимость материала.

Как видим, между электрическим и магнитным сопротивлениями есть известная аналогия. Однако, в то время как δ в широких пределах постоянна, μ существенно зависит от величины индукции.

Подставляя приведенные значения в первую формулу, получим для магнитной цепи такое соотношение:

$$\Phi = \frac{0{,}4\pi \dot{I} w}{\frac{l}{\mu Q}}.$$

При расчете магнитных цепей катушек может случиться, что полученная магнитная индукция будет иметь значительную величину, близкую к насыщению. К каким



Фиг. 67.

неприятным последствиям это может привести, мы видели в предыдущей главе. Чтобы уменьшить полученную индукцию, недостаточно просто увеличить сечение сердечника, так как при этом сопротивление магнитной цепи также уменьшится. Поэтому в таких случаях часто прибегают к искусственному повышению сопротивления цепи путем введения небольшого воздушного зазора, обычно порядка долей миллиметра, для чего между соединяемыми частями магнитной цепи вставляют немагнитные прокладки требуемой толщины из бумаги, картона и т. п. (см. n на фиг. 67). При введении воздушного зазора,

благодаря увеличившемуся сопротивлению цепи магнитный поток, а вместе с ним и индукция уменьшаются.

Так как сопротивления отдельных участков магнитной цепи, следующих один за другим, складываются, то при наличии воздушного зазора формула для такой цепи примет следующий вид:

$$\Phi = \frac{0{,}4\pi \dot{I} w}{\frac{l_c}{\mu Q} + \frac{l_в}{Q}},$$

где l_c — средняя длина пути силовых линий в стали, *см*;
$l_в$ — длина воздушного зазора, *см*.

В этой формуле дробь $l_в/Q$ представляет собой магнитное сопротивление воздушного зазора.

Чтобы более ясно представить себе простейшие методы расчетов магнитных цепей, решим одну из возможных в радиолюбительской практике задач.

Допустим, что для фильтра кенотронного выпрямителя, дающего пульсирующий ток силой 20 *ма*, требуется изготовить дроссель с индуктивностью в 100 *гн*. Так как в формуле индуктивности

$$L = \frac{4\pi w^2 \mu Q}{10^9 l} \qquad \text{(A)}$$

кроме заданной индуктивности L нет ни одной известной величины, то, определив для каждой из них произвольные, но возможные значения, произведем пробный расчет. Результаты такого подсчета позволят судить о том, насколько правильно был произведен выбор значений и как их в случае необходимости надо изменить. При наличии подходящего готового сердечника можно за основу для подсчетов принять его размеры.

Так, пользуясь данными фиг. 67, примем:

$Q = 15 \cdot 15 = 225$ *мм*² $= 2{,}25$ *см*²; $l_c = 180$ *мм* $= 18$ *см*; $l_в = 0{,}2$ *мм* $=$ $= 0{,}02$ *см* (два зазора по 0,1 *мм*); $w = 5\,000$ витков.

Величину l, т. е. полную длину пути силовых линий с учетом воздушного зазора, подсчитаем потом дополнительно. Для определения μ проделаем еще расчет по формуле

$$\Phi = \frac{0{,}4\pi \dot{I} w}{\frac{l_c}{\mu Q} + \frac{l_в}{Q}}. \qquad \text{(B)}$$

Для предварительного определения величины μ примем произвольную, но возможную величину индукции $B = 10\,000$ *гс*. По кривой

зависимости μ от B для средних сортов мягкой стали (фиг. 68) при взятой индукции $B = 10\,000$ *гс* находим: $\mu = 2\,700$. Подставляем ее для проверки в формулу (B):

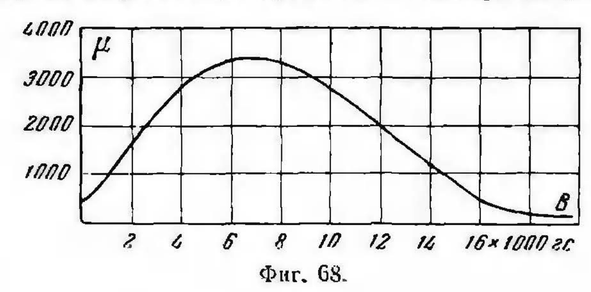
$$\Phi = \frac{1{,}26 \cdot 0{,}02 \cdot 5\,000}{\frac{18}{2\,700 \cdot 2{,}25} + \frac{0{,}02}{2{,}25}} = \frac{126}{0{,}003 + 0{,}009} = 10\,500 \text{ мкс.}$$

При этом получается:

$$B = \frac{\Phi}{Q} = \frac{10\,500}{2{,}25} \approx 4\,670 \text{ гс,}$$

а μ (по кривой фиг. 68) — около 3 100.

Следовательно, взятые нами вначале $B = 10\,000$ *гс* и $\mu = 2\,700$ были выбраны неправильно, и нужно взять меньшую индукцию.



Фиг. 68.

Выберем $B = 5\,000$ *гс*. По кривой фиг. 68 находим $\mu = 3\,100$ Тогда

$$\Phi = \frac{1{,}26 \cdot 0{,}02 \cdot 5\,000}{\frac{18}{3\,100 \cdot 2{,}25} + \frac{0{,}02}{2{,}25}} = \frac{126}{0{,}0026 + 0{,}009} = 10\,800 \text{ мкс.}$$

При этом

$$B = \frac{10\,800}{2{,}25} = 4\,830 \text{ гс,}$$

что примерно соответствует выбранной нами величине индукции.

Величину $\mu = 3\,100$ мы и принимаем для подсчета индуктивности L.

Величина l в формуле (А) есть средняя длина магнитной силовой линии. Для определения l, состоящей из суммы путей в воздухе и в стали, надо для $l_в$ найти величину, эквивалентную пути в стали, т. е. определить, какой длине пути в стали будет соответствовать 0,02 *см* пути в воздухе.

Проницаемость стали в μ раз больше проницаемости воздуха и магнитное сопротивление стали в μ раз меньше сопротивления воздуха; таким образом, путь $l_в$, пройденный в воздухе, эквивалентен пути $l_э$, в μ раз большему, чем путь в стали.

Длина пути магнитного потока в воздухе $l = 0{,}02$ *см*. Эквивалентная длина пути в стали будет равна:

$$l_э = 0{,}02 \cdot \mu = 0{,}02 \cdot 3\,100 = 62 \text{ см}.$$

Полная величина l составит:

$$l = l_c + l_э = 18 + 62 = 80 \text{ см}.$$

Теперь у нас имеются все данные для подсчета индуктивности

$$L = \frac{4\pi w^2 \mu Q}{10^9 l} = \frac{12{,}56 \cdot 5\,000^2 \cdot 3\,100 \cdot 2{,}25}{10^9 \cdot 80} = 27{,}4 \text{ гн}.$$

Как видим, индуктивность дросселя получилась значительно меньшей, чем это требовалось. Чтобы увеличить ее при тех же размерах стали, можно увеличить количество витков и несколько уменьшить величину зазора. Увеличение количества витков, если это позволяют размеры сердечника, весьма выгодно, так как величина w входит в формулу в квадрате. Что касается уменьшения зазора, то это здесь не даст нужных результатов, так как практически такие зазоры трудно выполнить точно из-за неровностей стали и возможных смещений частей сердечника при сборке. При малых значениях зазора даже небольшие изменения, например в 0,1 *мм* при зазоре в 0,2 *мм*, сильно скажутся на конечном результате — величине индуктивности.

Допустимую нагрузку для провода катушки принимают от 1 до 3 *а* на 1 *мм²* сечения проволоки. Чтобы не допустить большого падения напряжения на обмотке дросселя, примем допустимую нагрузку в 1 *а/мм²*. Тогда при силе тока 0,02 *а* необходимое сечение проволоки будет равно $0{,}02/1 = 0{,}02$ *мм²*, а ее диаметр 0,16 *мм*.

Определив по допустимой нагрузке и силе проходящего тока сечение и диаметр проволоки и проверив имеющуюся для намотки площадь, возьмем новое, увеличенное количество витков, равное 10 000. Величину воздушного зазора уменьшим до 0,15 *мм* = 0,015 *см* и подсчитаем величину индуктивности тем же путем.

Для определения μ в формуле (В) примем $B = 11\,000$ *гс* и $\mu = 2\,300$ (по кривой фиг. 68); так же как и в первом случае, заменим их, если они окажутся неправильными:

$$\Phi = \frac{1{,}26 \cdot 0{,}02 \cdot 10\,000}{\dfrac{18}{2\,300 \cdot 2{,}25} + \dfrac{0{,}015}{2{,}25}} = 25\,000 \text{ мкс},$$

откуда

$$B = \frac{\Phi}{Q} = \frac{25\,000}{2{,}25} = 11\,000 \text{ гс и } \mu = 2\,300.$$

Мы видим, что эти величины были выбраны правильно.

Подсчитаем теперь полную длину пути l. В данном случае $l_в = 0{,}015$ *см*, $\mu = 2\,300$, эквивалентное $l_э = 0{,}015 \cdot 2\,300 = 34{,}5$ *см*. Тогда

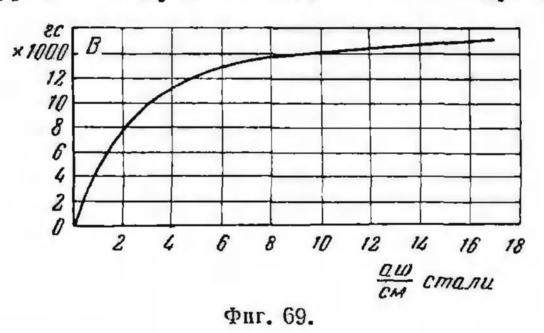
$$l = l_c + l_э = 18 + 34{,}5 = 52{,}5 \text{ см}.$$

Наконец, определяем индуктивность дросселя с увеличенным числом витков и с уменьшенным зазором

$$L = \frac{12{,}56 \cdot 10\,000^2 \cdot 2\,300 \cdot 2{,}25}{10^9 \cdot 52{,}5} \approx 124 \text{ гн.}$$

Следует отметить, что при этих расчетах мы допустили неточность в определении площади сердечника в части учета неплотности прилегания листочков сердечника (бумажная оклейка, недостаточная плотность набивки). Действительное сечение стали, служащей магнитопроводом, следовало бы взять меньше принятого, а именно 2,0 *см*² вместо 2,25 *см*². При этом условии индуктивность дросселя будет несколько меньшей и примерно совпадет с требуемой величиной, т. е. 100 *гн*.

Выбранное количество витков можно проверить еще до определения коэффициента индуктивности. Делается это следующим образом



Фиг. 69.

Пользуясь кривой, изображенной на фиг. 69, определим то количество ампервитков, которое необходимо для создания магнитного потока в стали при величине индукции, равной 11 000 *гс*. Оно окажется равным 3,8 *aw/см*. Тогда для создания магнитного потока на длине 18 *см* потребуется:

$$3{,}8 \cdot 18 = 68{,}4 \ aw.$$

Таким же образом определим количество ампервитков, необходимых для поддержания того же потока в воздушном зазоре длиной 0,015 *см*. Для этого по кривой фиг. 70 при $B = 11\,000$ *гс* находим величину от 85 до 86 *aw*/0,01 *см*, т. е. от 8 500 до 8 600 *aw* на 1 *см* воздушного зазора. Для нашего случая получаем:

$$8\,600 \cdot 0{,}015 = 129 \ aw,$$

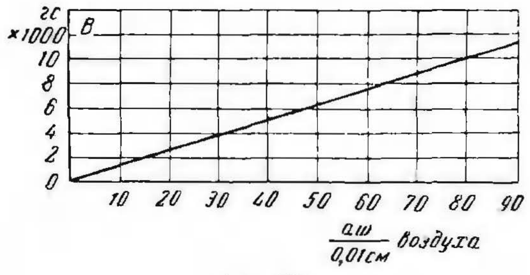
а всего

$$68{,}4 + 129 = 197{,}4 \ aw.$$

При запроектированной силе тока 0,02 *а* это даст:

$$w = \frac{197{,}4}{0{,}02} = 10\,000 \text{ витков.}$$

Пользуясь приведенными здесь формулами и кривыми, можно решать и другие подобного рода задачи, встречающиеся в любительской практике. Так как такой способ все



Фиг. 70.

же довольно кропотлив, то для расчета часто применяют готовые таблицы, графики и номограммы, при помощи которых все производится значительно быстрее.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ [1]

ОСНОВНЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ЖЕЛЕЗО И СТАЛЬ

Железо — основной ферромагнитный материал — широко распространено в природе, главным образом в виде соединения с кислородом — железных руд. Первый этап извлечения железа из руд производится в доменных печах, где под влиянием высокой температуры кислород руды соединяется с углеродом раскаленного топлива — кокса, угля, а освободившееся расплавленное железо стекает на под печи. На своем пути вниз железо все время соприкасается с топливом и, соединяясь с его углеродом, превращается в чугун. Так как высокое содержание углерода в чугуне (от 1,7 до 4,5%) обусловливает целый ряд его механических и других свойств, часто не соответствующих предъявляемым требованиям из-за большой хрупкости, высокой твердости, невозможности ковки, сварки, малой проницаемости и т. д.,

[1] При составлении гл. 4 были использованы опубликованные в печати работы ряда советских исследователей магнитных материалов, в том числе работы А. С. Займовского, Л. Ш. Казарновского, О. Н. Альтгаузен и др.

то чугун подвергается дальнейшей переработке в специальных печах (конвертеры, мартеновские печи), где избыточный углерод, а вместе с ним и значительное количество попавших из руды и топлива примесей серы, фосфора и др. выгорают. Однако полное удаление углерода таким способом невозможно, и полученный металл представляет собой железо с примесью углерода до 1,7%, так называемую сталь. Получение совершенно чистого железа без углерода и других примесей сопряжено с большими трудностями; промышленное же железо, за исключением специальных сортов, всегда содержит углерод, в силу чего название «железо» сохранено только за чистым железом, а получаемый нормальным производственным процессом металл, неизбежно содержащий углерод, называют сталью (кровельная сталь, динамная сталь, трансформаторная сталь и т. д.).

Влияние основных примесей на качество стали. Наличие примесей, а также их процентное содержание в стали существенным образом влияют на ее магнитные свойства.

Постоянным спутником стали, как только что было сказано, является углерод. С увеличением его содержания увеличивается твердость стали, а вместе с тем и коэрцитивная сила, определяющая величину остаточного магнетизма; если твердая сталь намагничена, она долго сохраняет свои магнитные свойства. Поэтому стали с повышенным содержанием углерода могут применяться для изготовления постоянных магнитов. Наоборот, для изготовления приборов, работающих в цепях с переменной магнитной нагрузкой, такие стали непригодны, так как на их перемагничивание будет бесполезно расходоваться значительное количество энергии. Увеличение содержания углерода понижает также проницаемость стали и, следовательно, уменьшает магнитный поток при той же намагничивающей силе, т. е. при тех же ампервитках. Для уменьшения потерь на гистерезис и для увеличения проницаемости количество углерода в сталях, предназначенных для работы в переменных магнитных полях, в частности в листовых электротехнических сталях (динамной, трансформаторной), по возможности, уменьшают.

Величина вихревых токов, возникающих в сердечниках электрических машин и приборов, при прочих равных условиях определяется величиной электрического сопротивления материала. Для уменьшения вихревых токов сопротивление листовых электротехнических сталей, предназначенных для работы в переменных магнитных полях, искусственно по-

вышают, добавляя при плавке кремний. Помимо значительного, в несколько раз, увеличения электрического сопротивления кремний несколько улучшает также и магнитные свойства стали, так как он «обезвреживает» влияние углерода. С увеличением содержания кремния коэрцитивная сила и потери на гистерезис уменьшаются.

Одним из способов уменьшения потерь на вихревые токи является возможно более тонкая прокатка стали, благодаря чему возрастает электрическое сопротивление материала. Однако при прокатке стали до слишком малой толщины, например до 0,05—0,1 *мм*, резко возрастают потери на гистерезис, что обесценивает снижение потерь на вихревые токи.

Присутствие кремния в стали в сильной степени влияет на ее механические свойства: сталь с повышенным содержанием кремния становится весьма хрупкой и твердой, что затрудняет ее обработку — прокатку и штамповку, поэтому содержание кремния, например, в трансформаторной стали не доводят больше, чем до 4—4,5%, хотя сталь, содержащая 5—6% кремния, показывает в слабых магнитных полях наилучшие магнитные свойства.

Расплавленная сталь, как и другие металлы, в жидком состоянии (в процессе переработки) поглощает из окружающей атмосферы различные газы, присутствие которых вызывает уменьшение проницаемости, увеличение коэрцитивной силы и, как следствие, увеличение потерь на гистерезис. Поэтому листовую электротехническую сталь, в случае необходимости получения особенно высокого ее качества, иногда дополнительно обрабатывают путем отжига в вакууме или в специальной атмосфере — в азоте, диссоциированном аммиаке, где поглощенные газы удаляются или химически связываются.

Влияние посторонних примесей на магнитные свойства железа и стали весьма велико; у рафинированного электролитического железа, отожженного в вакууме и содержащего незначительное количество примесей, максимальная проницаемость достигает 180 000 при коэрцитивной силе 0,05 *э* и потерях — 0,3 *вт/кг*. Данные чистого железа, изготовленного обычным производственным процессом, так называемого железа Армко, во много раз хуже: максимальная проницаемость не превышает 7 000, а коэрцитивная сила возрастает до 0,7—0,9 *э*.

Влияние механической и термической обработки на магнитные свойства стали. Всякая механическая обработка —

прокатка, резка и особенно ударная — штамповка, рихтовка и т. д. — вызывает внутренние напряжения в сталях и значительно ухудшает их магнитные свойства. Поэтому листовую электротехническую сталь, идущую на изготовление сердечников, обрабатывают по возможности меньшим количеством операций, применяя для этого острый инструмент (ножницы, штампы). Лишние операции — изгибания, а затем рихтовка и т. д., как это часто имеет место в любительской обстановке, недопустимы.

Наибольшие деформации и ухудшения магнитных свойств получаются непосредственно у мест обработки — у резаных и штампованных кромок и в местах ударов. Поэтому особенное влияние механическая обработка оказывает на ухудшение магнитных свойств узких, в несколько миллиметров, полос стали, где деформированные места находятся близко друг к другу. При этом уменьшение проницаемости может достигать 20—30%, а потери на гистерезис могут увеличиться на 100% и больше. Потери на гистерезис при механической обработке стали растут с увеличением толщины материала, так как при повышенной толщине необходимы большие усилия для обработки, что вызывает большие деформации.

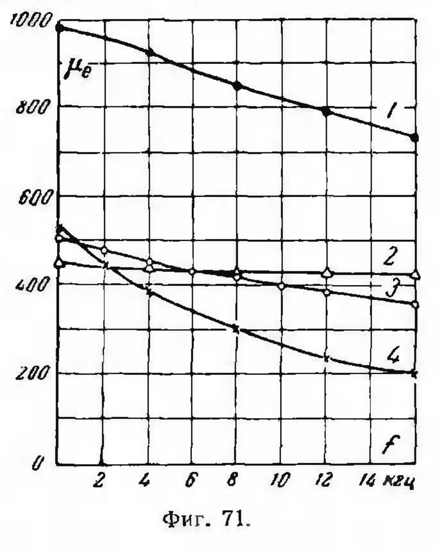
Путем отжига при температуре 700—800° С с последующим медленным охлаждением можно уничтожить возникшие в стали деформации и почти полностью восстановить ее магнитные свойства. Отжиг заготовок динамной стали при 750—800° С для снятия образовавшегося при штамповке наклепа снижает потери на 25—30%. Однако охлаждение должно быть весьма медленным — не больше 25—30° С в час, так как при быстром охлаждении может произойти закалка стали с дальнейшим понижением проницаемости и значительным повышением коэрцитивной силы. Последним обстоятельством пользуются при изготовлении постоянных магнитов: для увеличения коэрцитивной силы сталь закаливают путем погружения после значительного нагрева в масло, воду или в специальные охлаждающие смеси. Отжиг стали производят в атмосфере, исключающей окисление ее, в частности в водороде.

При прокатке кристаллики стали ориентируются определенным образом — образуется так называемая текстура, и поэтому магнитные свойства ее в продольном и поперечном направлениях различны. В листовых электротехнических сталях в продольном направлении проницаемость на

20—25% выше, а потери на вихревые токи и гистерезис на 10—15% меньше, чем в поперечном. Поэтому, когда хотят наилучшим образом использовать магнитные свойства стали, ее раскраивают так, чтобы направление магнитных силовых линий, по возможности, совпадало с направлением прокатки.

Влияние прокатки отжигом не устраняется.

Влияние толщины листов и частоты намагничивающего поля на проницаемость стали. С повышением частоты намагничивающего поля проницаемость ферромагнитных материалов уменьшается. Даже в области звуковых частот до 10—15 *кгц* многие трансформаторные материалы, применяемые в низкочастотных цепях приемников и усилителей, с повышением частоты в сильной степени уменьшают свою проницаемость, что может привести к искажениям. При этом большую роль играет не только материал, использованный для изготовления сердечника, но и его толщина. Так, например, у трансформаторной стали марки Э4АА с повышением частоты от 200 *гц* до 50 *кгц* проницаемость уменьшается: при толщине листа 0,375 *мм* на 87%, а при толщине 0,06 *мм* всего на 29%.



Фиг. 71.

Таким образом, проницаемость у тонких листов при повышени частоты изменяется значительно меньше, чем у толстых. Такая же зависимость проницаемости от толщины листов при различных частотах имеет место и у других трансформаторных материалов.

На фиг. 71 показано изменение проницаемости различных материалов в зависимости от частоты. *1* — холоднокатанная сталь марки ХВП толщиной 0,09 *мм*; *2* — горячекатанная сталь марки ВЧ-2 толщиной 0,1 *мм*; *3* — горячекатанная сталь марки ВЧ-2 толщиной 0,2 *мм*; *4* — горячекатанная сталь марки Э4АА толщиной 0,35 *мм*.

Кривые показывают, что новая сталь марки ВЧ-2, особенно при малой толщине листа, обеспечивает значительно бо́льшую устойчивость проницаемости при изменении частоты, чем лучшая из стандартизованных сталей марки Э4АА. При толщине листа 0,1 *мм* проницаемость стали ВЧ-2 в области звуковых частот практически можно считать постоянной.

Влияние величины зерен на магнитные свойства ферромагнитных материалов. Если ферромагнитное тело раздробить на очень малые частицы диаметром в 0,00001 *мм* или меньше, то такое зерно будет представлять собой одну единственную область спонтанного намагничения, намагниченную в одном направлении. Намагничивание такой малой частицы происходит иначе, чем намагничивание частиц большего размера, имеющих большое количество областей, намагниченных в различных направлениях. При внесении такой частицы в постороннее магнитное поле этапа смещения границ нет, а намагничивание начинается прямо с вращения намагничения. На это затрачивается значительная энергия внешнего поля, но зато намагничение в новом направлении сохраняется очень устойчиво, так как такая малая частица, как оказывается, обладает значительной коэрцитивной силой. Это позволяет изготовлять постоянные магниты из, казалось бы, совсем неподходящих материалов, например из чистого железа, обладающего в обычном виде ничтожной коэрцитивной силой. Такие магниты, изготовленные из тонкого порошка чистого железа, спрессованного до большой плотности, близкой к плотности целого куска, в настоящее время изготовляются в промышленном масштабе.

* * *

По своему назначению ферромагнитные материалы можно разделить на две основные группы:

1. Магнитно-мягкие материалы, к которым следует отнести электротехнические стали и сплавы, применяемые в качестве сердечников катушек и обмоток различных электрических устройств: генераторов, электродвигателей, трансформаторов, электромагнитов и т. д.

2. Магнитно-твердые материалы, к которым относятся: магнитные стали и сплавы, применяемые для изготовления постоянных магнитов для индукторов, магнето, громкоговорителей, телефонных трубок и т. д.

МАГНИТНО-МЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Динамная и трансформаторная стали. Основными наиболее распространенными представителями первой группы являются динамная и трансформаторная стали. С точки зрения химического состава эти стали разнятся между собой главным образом по содержанию кремния (в трансформаторной стали кремния больше) и прочих примесей — фосфора, серы, марганца, которых содержится меньше в трансформаторной стали. Содержание углерода в обоих сортах примерно одинаково. Меньшее количество примесей в значительной степени определяет более высокие магнитные свойства трансформаторной стали: максимальная проницаемость ее выше, чем у динамной (7 500 против 5 000 у динамной и против 3 500 у средних сортов обычных, неэлектротехнических сортов сталей), а коэрцитивная сила меньше почти в 2 раза (0,5 против 0,9 *э*). Меньшая коэрцитивная сила и примерно в 3 раза большее электрическое сопротивление обусловливают и меньшие потери в трансформаторной стали на гистерезис и вихревые токи (при частоте 50 пер/сек, индукции 10 000 *гс* и толщине листа 0,35 *мм* около 1,5 против 3,0 *вт/кг* у динамной).

Однако, в силу указанных выше трудностей в обработке трансформаторной стали, она значительно, примерно в 2—3 раза, дороже динамной. Поэтому при конструировании машин и приборов, если нет специальных повышенных требований к стали, учитывается и это экономическое обстоятельство. Для работы в постоянных магнитных полях применяют обычно динамную сталь, а в переменных — трансформаторную.

Следует отметить, что действующий в настоящее время стандарт (ГОСТ 802-41) не производит разделения листовых электротехнических сталей на динамную и трансформаторную. По ГОСТ сталь выпускается 12 сортов под марками:

Э1, Э1А; Э1АБ; Э1АА; Э1ААБ; Э2; Э2Б; Э3; Э3А; Э4; Э4А; Э4АА.

Значения букв и цифр в условных обозначениях марок стали следующие: Э — электротехническая; цифры 1, 2, 3, 4 — степень легированности — среднее процентное содержание кремния; А — улучшенного качества с уменьшенными потерями; АА — высокого качества с малыми потерями; Б — с повышенной магнитной индукцией.

Старые названия стали — динамная и трансформаторная — применены для лучшего усвоения различия, существующего между листовыми электротехническими сталями, применяемыми в постоянных и переменных магнитных полях. К трансформаторным обычно относят стали, содержащие около 4% кремния (марки Э4, Э4А и Э4АА), остальные — к динамным.

В последнее время для изготовления качественных трансформаторов начали применять сердечники из освоенной нашей промышленностью новой трансформаторной стали марки ХВП (холоднокатанная с высокой проницаемостью), отличающейся исключительно высокими магнитными свойствами. В процессе производства сталь ХВП, содержащая 3,5% кремния и 0,005% углерода, подвергается холодной прокатке с промежуточными отжигами, в том числе отжигу в водороде при 1 100° С. В результате этого сталь получает сильно выраженную ориентировку кристаллов, резко повышенную вдоль направления прокатки проницаемость и значительно сниженные потери. Для определенного значения индукции сталь марки ХВП по сравнению с одним из лучших сортов трансформаторной стали марки Э4АА требует в несколько раз меньше намагничивающих ампервитков и дает в 2 раза меньшие потери (0,6 *вт/кг*). Трансформаторы, изготовленные из стали ХВП, по сравнению с обычными имеют вес на 20—25% меньший.

Нашей промышленностью разработаны также новые марки горячекатанной стали ВП-1, ВП-2, ВП-3, ВЧ-2 и др., которые по проницаемости и потерям в слабых полях значительно превосходят обычную сталь Э4АА.

Железо Армко. Замечательные магнитные свойства рафинированного железа побудили металлургов заняться его производством для промышленных целей. Этот металл, содержащий примесей всего около 0,05%, получил название железа Армко. Наряду с удовлетворительными магнитными свойствами железо Армко обладает также хорошими механическими свойствами: в противоположность трансформаторной стали оно мягко, тягуче, легко выдерживает самую тяжелую штамповку и хорошо противостоит ржавлению. Серьезным недостатком, делающим использование его в переменных магнитных полях нежелательным, является малое электрическое сопротивление. Максимальная проницаемость железа Армко 7 000, коэрцитивная сила 0,7 *э*.

Пермаллой. Помимо ферромагнитных материалов на железной основе существует значительное количество магнитных сплавов, в которые железо входит как добавка к другим металлам, либо в которых оно отсутствует вовсе (например сплав Гейслера). Интересно отметить, что при введении в сплавы небольших количеств железа некоторые из них становятся диамагнитными.

Некоторые из подобных сплавов обладают исключительными магнитными свойствами, например, сплав пермаллой, состоящий из 78% никеля и 21% железа. Его максимальная проницаемость в слабых полях в 15—20 раз больше, чем у трансформаторной стали, коэрцитивная сила ничтожна и составляет всего 0,05 *э*. Начальная проницаемость отечественного молибденового пермаллоя, отожженного при 1 200° С, достигает величины 15 000—18 000, а максимальная 120 000 — 130 000. Пермаллой замечателен тем, что он намагничивается до насыщения уже в незначительных полях.

Существует много разновидностей пермаллоя — муметалл, гиперник, рометалл и другие, которые отличаются несколько измененным химическим составом и имеют сходные магнитные свойства.

Альсифер. Большое содержание никеля и молибдена — дорогих и дефицитных материалов—в значительной степени затрудняет широкое применение пермаллоя. Поэтому были разработаны сплавы без этих элементов, обладающие сходными магнитными свойствами. Одним из таких сплавов, который представляет собой ценный качественный заменитель пермаллоя, является альсифер или сендаст.

Основой сплава альсифер является железо Армко, к которому добавляется 9,5% кремния и 5,6% алюминия. Альсифер очень хрупок и тверд, не поддается ковке и прокатке и может обрабатываться только шлифованием. Поэтому альсифер применяется в виде отливок необходимой формы, либо в виде порошка (о применении порошкообразных магнитных материалов будет сказано ниже).

Магнитные свойства альсифера близки к магнитным свойствам пермаллоя.

Литой альсифер применяется в магнитных цепях с постоянным или медленно меняющимся магнитным потоком, в частности для магнитных экранов, реле — там, где нужна большая проницаемость и недопустима остаточная намагниченность.

Пермендюр. В тех случаях когда от магнитного материала требуется максимальная индукция (полюсные наконечники постоянных магнитов, кольцевые вставки в фланцы и на керны динамических громкоговорителей, телефонные мембраны и другие детали, работающие в сильном постоянном магнитном поле), применяется пермендюр — сплав железа Армко с 50% кобальта и 1,8% ванадия.

Насколько эффективно применение качественных магнитных материалов, можно судить по тому, что разработанные в одной из наших лабораторий телефоны с мембраной из пермендюра, с полюсными наконечниками из пермаллоя и с магнитами из никель-алюминиевого сплава имеют акустическую отдачу, в 2—3 раза большую, чем у обычных телефонов.

Термомагнитные сплавы. В тех случаях, когда от постоянных магнитов, работающих при больших колебаниях температур, необходимо получить стабильный магнитный поток, например в авиационных магнитоэлектрических измерительных приборах и т. п., магниты шунтируются специальными термомагнитными сплавами. При повышении температуры (например, когда самолет садится после полета на большой высоте) индукция магнита снижается, а сопротивление проволоки в рамке повышается, в результате этого приборы начинают давать заниженные показания. При использовании термомагнитных сплавов магнитное сопротивление шунта с повышением температуры повышается и магнитный поток перераспределяется между шунтом и зазором так, что при этом компенсируется не только понижение индукции, но и уменьшение электропроводности проволоки.

Советские термомагнитные сплавы, содержащие кроме железа Армко 35% никеля, 0,3% кремния и 7—12% хрома, при колебаниях температуры от 0 до 100° С допускают индукцию, в 2—4 раза большую, чем известные иностранные сплавы этого типа — кальмаллой и термаллой.

Термомагнитные сплавы могут применяться для температурной компенсации в пределах температур от —70° до +70°.

Магнитодиэлектрики. Особые требования предъявляются к магнитным материалам, предназначенным для работы в переменных магнитных полях высокой частоты. Изменение направления и напряженности магнитного поля с частотой в миллионы и десятки миллионов периодов в секунду в обычных электротехнических сталях вызывает огромные потери на вихревые токи и гистерезис, которые особенно

заметны и вредны при маломощных, используемых в радиотехнике токах. Поэтому электротехнические стали и сплавы в обычном их виде, даже в виде весьма тонких листов и проволоки, при радиочастотах не применяются.

Однако потребность в сердечниках для катушек, работающих в высокочастотных цепях, велика, так как такие катушки по сравнению с катушками без сердечника имеют ряд существенных преимуществ, в частности в несколько раз меньшие размеры, в 2—3 раза меньший расход обмоточного провода, уменьшение определяемого длиной провода активного сопротивления и связанных с этим потерь, удобную подгонку контуров и т. д.

Поиски ферромагнитных материалов, пригодных для использования в высокочастотных цепях, производились с тех пор, как существует радиотехника. Однако первые практически пригодные сердечники для высокочастотных катушек были созданы лишь в 1932 г. Материалом для них послужил так называемый феррокарт, изготовлявшийся из мелкоразмолотого железа, нанесенного с изолирующим лаком на полосы тонкой бумаги, которые затем спрессовывались в блоки нужной толщины. Производство феррокарта обходилось дорого, а магнитные свойства его не удовлетворяли предъявлявшимся требованиям.

В 1935 г. появились более дешевые и с лучшими магнитными свойствами магнетитовые сердечники, изготовлявшиеся из магнетита (железная руда — магнитный железняк). Размолотый магнетит для уменьшения потерь на вихревые токи перемешивается с лаком, который изолирует отдельные частицы друг от друга и служит в качестве связующего вещества. Готовая смесь спрессовывается в сердечники необходимой формы. Благодаря быстроте изготовления и дешевизне магнетитовые сердечники широко применяются в массовой радиоаппаратуре. Однако высокий температурный коэффициент проницаемости (изменение проницаемости при нагреве, который всегда имеет место в приемно-усилительных устройствах) и заметное старение (изменение проницаемости со временем) делают магнетит непригодным для высококачественной аппаратуры.

Исследования, производившиеся с материалами этого рода, привели к созданию целого семейства так называемых неметаллических ферритов (неметаллических потому, что железо входит не в виде металла, а в виде окисла), свободных от присущих магнетиту недостатков. Малая прони-

цаемость этих материалов была значительно повышена путем комбинирования простых ферритов с ферритом цинка. Так, например, в смеси феррита никеля с ферритом цинка ($NiFe_2O_4+ZnFe_2O_4$) наряду с ничтожными потерями на вихревые токи, обусловленными исключительно высоким электрическим сопротивлением, проницаемость удалось довести до значений порядка 3 000—4 000. Можно думать, что неметаллические ферриты найдут широкое применение в вещательной и специальной аппаратуре.

Вопрос о сердечниках для высокочастотных катушек получил удовлетворительное решение лишь в сравнительно недавнее время. Основой этих сердечников являются порошкообразные ферромагнетики, обладающие соответствующими магнитными свойствами (чистое, осажденное из раствора, так называемое карбонильное железо, пермаллой, альсифер и др.) и спрессованные с изолирующими лаками.

Высокое качество исходных ферромагнетиков обеспечивает этим материалам малую коэрцитивную силу и незначительные потери на гистерезис, а ничтожный размер отдельных частиц (микроны) — такие же незначительные потери на вихревые токи.

Магнитная проницаемость этих прессованных материалов, носящих общее название м а г н и т о д и э л е к т р и к о в, определяется рядом факторов: магнитными свойствами исходного материала, размерами зерен порошка, количеством порошка в смеси, а также технологией изготовления. Проницаемость магнитодиэлектриков в зависимости от этих факторов колеблется от 5 до 250. Так, например, сердечники, спрессованные из карбонильного железа и применяемые в области частот до 100 *мгги*, имеют проницаемость, равную 8.

Нашей промышленностью изготовляются магнитодиэлектрики из пермаллоя, а также из альсифера, размалываемых в шаровых мельницах в порошок надлежащей тонкости. Сердечники из альсифера удобны в производстве, дешевы и обладают высокими магнитными свойствами. Индуктивность катушек при введении в них сердечников из порошкообразного альсифера марки ФИ (ферроиндукторный) увеличивается в 8—12 раз. По проницаемости, влиянию на добротность контуров, температурному коэффициенту и другим характеристикам эти сердечники превосходят известные сердечники из карбонильного железа, считающегося материалом высокого качества. Электрическое сопротивление их

в 15 раз больше, чем сопротивление сердечников из карбонильного железа.

Альсифер ФИ применяется в области частот от 150 до 1 000 *кгц*. Альсифер РЧ-9 (радиочастотный с проницаемостью, равной 9) используется в диапазоне от 500 до 2 000 *кгц*. Для более высоких частот, вплоть до 45 *мггц*, применяется альсифер РЧ-6, который изготовляется из наиболее мелкого порошка с высококачественным диэлектриком — полистиролом.

Применение магнитодиэлектриков из альсифера в настоящее время ограничено областью частот от 100 *кгц* до 45 *мггц*. В наших лабораториях ведутся работы по получению более тонких порошков, что позволит расширить эту область в сторону более высоких частот.

Высокое качество отечественных магнитодиэлектриков на базе сплава альсифер как по магнитным свойствам, так и по величине потерь на вихревые токи, их дешевизна и простота изготовления позволяют им занять прочное место среди других качественных магнитных материалов.

МАГНИТНО-ТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Постоянные магниты получили в технике большое распространение. Телефонные индукторы, магнето для двигателей внутреннего сгорания, маломощные генераторы переменного тока и электродвигатели, измерительные приборы, телефонные трубки, громкоговорители, приборы для научных работ и нужд медицины и многие другие устройства — являются многочисленными потребителями постоянных магнитов.

Постоянные магниты имеют целый ряд преимуществ перед электромагнитами: они не требуют посторонних источников энергии и связанных с этим эксплоатационных расходов, имеют меньшие габариты, потребляют значительно меньше дорогих цветных металлов. Поэтому во всех случаях, где это позволяют условия, применяются постоянные магниты.

Вольфрамовые и хромистые стали. В качестве материала для изготовления постоянных магнитов, особенно в массовых изделиях, наибольшее распространение получили вольфрамовые и хромистые стали. Простые углеродистые стали с содержанием углерода 0,5—1,5% также могут применяться для изготовления постоянных магнитов, однако качество их невысоко и в технике они не употребляются.

Качество постоянных магнитов в основном определяется величиной остаточной индукции, определяющей величину создаваемого поля, и коэрцитивной силой, определяющей устойчивость постоянных магнитов против размагничивающих влияний — сотрясений, посторонних магнитных полей и т. д. Остаточная индукция у магнитов из простой углеродистой стали довольно велика, не меньше, чем у других, более высокого качества сталей и для стали, содержащей 1,0% углерода, составляет около 10 000 *гс*, но коэрцитивная сила мала, всего около 40 *э*, в силу чего такие магниты сравнительно легко теряют свой магнетизм при воздействии внешних факторов. Магнитная энергия на единицу объема простых углеродистых сталей не превосходит 5 500 *эрг/см*³.

Магнитные свойства вольфрамовых и хромистых сталей отличаются между собой незначительно, и в общем они намного выше, чем у простых углеродистых сталей. Остаточная индукция хромистых сталей с содержанием около 2% хрома и 1% углерода составляет около 9 500 *гс*, при коэрцитивной силе 60 *э*. Магнитная энергия на единицу объема достигает 9 000 *эрг/см*³.

Данные вольфрамовой стали несколько выше: при остаточной индукции 10 000 *гс* и коэрцитивной силе около 65—70 *э* магнитная энергия их на единицу объема доходит до 11 000—12 000 *эрг/см*³.

Кобальтовая сталь. Значительным шагом вперед в деле повышения качества материалов для постоянных магнитов явился выпуск кобальтовой стали. Магнитная энергия кобальтовой стали с содержанием 35% кобальта в 3—4 раза больше, чем у вольфрамовых и хромистых сталей и достигает 35 000 *эрг/см*³, при остаточной индукции 10 000 *гс* и коэрцитивной силе 250 *э*. Магнитная устойчивость кобальтовой стали, в том числе и против температурных влияний, значительно выше, чем у других сталей.

Серьезным препятствием для широкого распространения кобальтовых сталей является их высокая цена, обусловленная большим содержанием дорогого и дефицитного кобальта.

Никель-алюминиевые сплавы. Еще большим шагом вперед в получении материалов для постоянных магнитов явилось создание никель-алюминиевых сплавов. В сплаве альни, содержащем 25% никеля, 15% алюминия и 60% железа при остаточной индукции 8 000—10 000 *гс* удается

достигнуть коэрцитивной силы порядка 500 *э* с доведением магнитной энергии до 80 000 *эрг/см*³.

Сплав **а л ь н и с и**, состоящий из 33% никеля, 13% алюминия, 1% кремния и 53% железа, при меньшей индукции, около 4 000—4 500 *гс*, имеет коэрцитивную силу около 800 *э*, что обеспечивает этому сплаву большую сопротивляемость размагничивающим факторам.

Семейство магнитных сплавов **а л ь н и к о**, содержащих кроме никеля и алюминия еще и кобальт, также обладает высокими магнитными свойствами. Сплав альнико V обладает остаточной индукцией, доходящей до 12 700 *гс*, при коэрцитивной силе 650 *э*. Сплав альнико XV имеет повышенную коэрцитивную силу, доходящую до 900 *э* при удовлетворительной индукции 6 500 — 8 500 *гс*.

Сопротивление никель-алюминиевых сплавов внешним воздействиям весьма велико. Постоянные магниты из никель-алюминиевого сплава почти не реагируют на сотрясения, без вреда переносят воздействие значительных внешних полей и не теряют своих магнитных свойств при нагреве до нескольких сот градусов, в то время как вольфрамовые и хромистые стали резко ухудшают свои магнитные свойства уже при температурах свыше 100—150° С. При равной силе магниты из никель-алюминиевого сплава имеют значительно меньшие габариты и вес, а при тех же габаритах— значительно большую силу. Стоимость никель-алюминиевого сплава в несколько раз меньше стоимости высокопроцентных кобальтовых сталей, и с учетом разницы в габарите и весе магниты из этого сплава обходятся дешевле даже магнитов из вольфрамовых и хромистых сталей.

В силу высокой твердости (твердость закаленной стали) и хрупкости магниты из никель-алюминиевого сплава не допускают никакой механической обработки кроме шлифовки. Поэтому их изготовляют непосредственной отливкой в форму, причем может быть допущено изготовление магнитов весьма малых размеров и с отношением длины к диаметру до 1:1, чего совершенно не допускают магниты из вольфрамовой и хромистой стали, требующие, чтобы длина в несколько раз превосходила диаметр магнита.

Магнико. Наивысшими магнитными свойствами в качестве материала для постоянных магнитов обладает советский сплав магнико, содержащий около 8% алюминия, 14% никеля, 24% кобальта, 3% меди и 51% железа. Магнико, как и сплавы альнико и альниси, отливается в соот-

ветствующих формах, причем охлаждение нагретых до 1 200° С отливок производится в сильном магнитном поле.

Остаточная индукция сплава магнико достигает 12 000—13 000 *гс* при коэрцитивной силе 500—550 *э*. Магнитная энергия сплава доходит до 200 000 *эрг/см*^{3}.

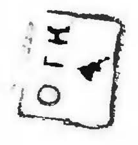
Сильманал. Для очень разомкнутых магнитных цепей, подвергающихся сильным размагничивающим воздействиям, где требуется максимальная коэрцитивная сила, применяется сплав сильманал, состоящий из 86,75% серебра, 8,8% марганца и 4,45% алюминия. Сплав интересен тем, что совсем не содержит железа. Остаточная индукция сплава невелика, всего около 590 *гс*, но коэрцитивная сила достигает очень больших значений — до 6 000 *э*.

Прессмагниты. Современная техника, в частности авиационная, потребовала создания измерительных магнитоэлектрических приборов чрезвычайно малых размеров с магнитами, вес которых колеблется от долей грамма до нескольких граммов. Так как эти магниты часто работают в очень трудных условиях (разомкнутая магнитная цепь, вибрация аппаратуры, малая допустимая длина магнита), то они должны изготовляться из материалов, обладающих высокой коэрцитивной силой.

Нашей промышленностью был разработан способ изготовления таких магнитов путем прессования порошков из никель-алюминиевых сплавов со связующими лаками в многогнездных прессформах. Это позволило резко увеличить выпуск магнитов и снизить их стоимость. Магнитные свойства прессмагнитов ниже свойств литых магнитов, однако при высоком качестве исходных материалов это позволяет получить вполне пригодные магниты. Так, например, прессмагниты, изготовленные из порошка сплава альнико, при остаточной индукции 3 500—4 000 *гс* имеют коэрцитивную силу, достигающую 600—800 *э*.

Металлокерамические магниты. Поиски способов массового изготовления магнитов с более высокими, чем у прессмагнитов, магнитными свойствами привели к созданию так называемых металлокерамических магнитов. При этом способе порошки размолотых магнитных сплавов прессуются и затем спекаются в водороде, после чего механическая обработка их почти не требуется.

Магнитные свойства металлокерамических магнитов почти одинаковы со свойствами литых магнитов из того же сплава.



(Начало см. 2-ю стр. обложки)

Вследствие этого при наличии магнетиков магнитная индукция будет обусловлена двумя видами токов — токами электрических цепей и атомными токами и может быть изображена суммой двух слагаемых:

$$B = H + J,$$

где H — напряженность поля и J — намагниченность.

Во всех точках поля вне магнетиков (в пустоте и практически в воздухе) намагниченность может быть принята равной нулю. Тем самым для немагнитной среды напряженность поля равна магнитной индукции, т. е. $B = H$.

По историческим причинам за единицей напряженности магнитного поля укоренилось название э р с т е д (сокращенно — *э*). Но из равенства $B = H$ видно, что напряженность магнитного поля может измеряться в гауссах и что 1 *э* = 1 *гс*.

Намагниченность может быть и положительной и отрицательной. Физически это означает, что магнитное поле атомных токов может или совпадать по направлению с внешним магнитным полем, или быть ему противоположным. Тело с положительной намагниченностью называется парамагнитным, а с отрицательной — диамагнитным. Однако для всех магнетиков, кроме принадлежащих к ферромагнитной группе, намагниченность составляет настолько малую часть магнитной индукции, что в инженерных расчетах она, как правило, не учитывается. Иначе обстоит дело с ферромагнетиками (железо, сталь, никель, кобальт, ряд сплавов), где намагниченность может оказаться в сотни и тысячи раз больше напряженности поля.

5. К о э ф ф и ц и е н т о м м а г н и т н о й п р о н и ц а е м о с т и вещества называется отношение величин магнитных потоков, создаваемых одним и тем же контуром тока в данном веществе и пустоте; обозначается буквой μ и является отвлеченным числом.

Проницаемость пустоты принята за единицу. Проницаемость воздуха близка к проницаемости пустоты и потому тоже может быть принята равной единице. Проницаемость диамагнитных тел меньше единицы, а парамагнитных — больше единицы. Но и для тех и для других (за исключением ферромагнитных) величины проницаемости близки к единице, у ферромагнитных же тел проницаемость в сотни и тысячи раз больше, чем у пустоты и воздуха.

Существенная разница между ферромагнитными и другими телами заключается еще в том, что проницаемость последних есть величина почти постоянная при любых степенях намагничения, в то время как проницаемость ферромагнитных тел есть величина переменная, сильно меняющаяся от степени намагничения.

6. К о э р ц и т и в н а я с и л а определяется напряженностью магнитного поля, необходимого для полного размагничивания взятого материала. Выражается в тех же единицах, что и напряженность магнитного поля.

7. К о э ф ф и ц и е н т и н д у к т и в н о с т и определяется числом магнитных силовых линий, пересекающих проводник за 1 сек., если за эту секунду сила тока в проводнике изменяется на 1 *а*. Коэффициентом индуктивности, равным единице, обладает такой проводник, в котором при изменении силы протекающего тока на 1 *а* за 1 сек. возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 *в*.

Такая единица носит название г е н р и (сокращенно — *гн*).

Обозначается коэффициент индуктивности буквой L.

Цена 3 р. 25 к.

Мне всегда нравились старые, сильно потрёпанные книжки. Потрёпанность книги говорит о её высокой востребованности, а старость о вечно ценном содержании. Всё сказанное в большей степени касается именно технической литературы. Только техническая литература содержит в себе ту великую и полезную информацию, которая не подвластна ни политическим веяниям, ни моде, ни настроениям! Только техническая литература требует от своего автора по истине великих усилий и знаний. Порой требуется опыт целой жизни, чтобы написать небольшую и внешне невзрачную книгу.

К сожалению ни что не вечно в этом мире, книги треплются, разваливаются на отдельные листы, которые затем рвутся в клочья и уходят в никуда. Плюс ко всему орды варваров, которым без разницы, что бросить в костёр или чем вытереть свой зад. Именно их мы можем благодарить за сожженные и растоптанные библиотеки.

Если у Вас есть старая книга или журнал, то не дайте им умереть, отсканируйте их и пришлите мне. Совместными усилиями мы можем создать по истине уникальное и ценное собрание старых технических книг и журналов.

Сайт старой технической литературы:

http://retrolib.narod.ru